Il terremoto che fece cambiare il corso del Po

Marzo 2017 € 4,50

Le Scienze

www.lescienze.it

edizione italiana di Scientific American

Un universo Matrix

E se il cosmo in cui viviamo fosse composto da unità fondamentali di informazione?

Evoluzione

Fossili piumati fanno luce sulla transizione evolutiva che dai dinosauri portò agli uccelli

Neuroscienze

Costruire cervelli in laboratorio per studiare le malattie, dalla schizofrenia all'Alzheimer

POSTE ITALIANE SPED. IN A.P. - D.L. 353/2003 CONV. L. 46/2004, ART. 1, C. 1, DCB - ROMA RIVISTA MENSILE - NUMERO 583

ART DÉCO

Gli anni ruggenti in Italia

FORLÌ

Musei San Domenico

11 febbraio
18 giugno 2017

Informazioni e prenotazioni mostra
tel. 199 15 11 34

Riservato gruppi e scuole
tel. 0543.36217
artdeco@civita.it
www.mostradecoforli.it

Orario di visita
da martedì a venerdì: 9.30-19.00
sabato, domenica, giorni festivi: 9.30-20.00
lunedì chiuso
17 e 24 aprile e 1 maggio apertura straordinaria
La biglietteria chiude un'ora prima

catalogo
SilvanaEditoriale

Fondazione
Cassa dei Risparmi
di Forlì

in collaborazione
con
Comune di Forlì

IN COPERTINA

Un'ipotesi che punta a unire meccanica quantistica e relatività generale prevede che lo spazio-tempo sia composto da elementi fondamentali di informazione.
(Illustrazione Kenn Brown, Mondolithic Studios)

Sommario

marzo 2017 numero 583

52

Ktsdesign/SPL/Getty Images

15

18

89

Rubriche

SCIENZA NEWS

Cortesia Jacques Hervé Fichet/CERN (*in basso*); Arco Digital Images/AGF (*al centro*); Thomas Deerinck, NCMIR/Science Photo Library/AGF (*in alto*)

di Marco Cattaneo

Automi alla riscossa

La rivoluzione dei robot umanoidi è sempre più vicina

Qui da noi è ancora materia da fantascienza, ma i giapponesi ormai devono averci fatto l'abitudine. Quando vanno a comprare un nuovo telefonino, per esempio, nei negozi della SoftBank. Il commesso che presenta i nuovi modelli e illustra i piani tariffari si chiama Pepper, ed è un robot umanoide sviluppato da un altro ramo della compagnia, la SoftBank Robotics.

Funziona talmente bene, Pepper, che la società è già riuscita a piazzarne 10.000 a clienti piccoli e grandi. Tra gli altri, Nestlé, che li usa in alcuni dei suoi esercizi per vendere macchine da caffè, e First Commercial Bank, che dopo un primo test nell'ottobre scorso ha pianificato di collocarne 20 nelle sue filiali di Taiwan.

Insomma, facciamocene una ragione: i robot umanoidi sono tra noi. E ci tolgono il lavoro, direbbe qualcuno. Ma questa è un'altra storia, anche se per nulla irrilevante. Piuttosto, la presenza di robot umanoidi nella nostra quotidianità evoca scenari degni di *2001: Odissea nello spazio* o di *Io, robot*, la celeberrima antologia del 1950 in cui Isaac Asimov enuncia le tre leggi della robotica.

«L'eventualità di un'apocalisse scatenata dai robot – scrivono Gordon Briggs e Matthias Scheutz a pagina 48 – è fra le più diffuse nell'immaginario popolare». Ma, avvertono, per il momento dovremmo piuttosto preoccuparci del potenziale pericolo rappresentato dagli esseri umani. «Gli esseri umani commettono errori. Possono dare istruzioni erronee o imprecise, distrarsi o cercare di ingannare i robot per fini discutibili».

In sintesi, sostengono Briggs e Scheutz, le leggi postulate da Asimov non sono sufficienti. O perlomeno vanno ripensate. Perché non è sempre saggio obbedire a un ordine che ci viene impartito, e così potrebbe essere per un robot soggetto agli ordini di un malintenzionato.

Sono passati dieci anni (si veda «Le Scienze» n. 461, gennaio 2007) da quando pubblicammo un illuminante articolo di Bill Gates intitolato *Un robot in ogni casa*, corredato da un breve intervento di Gianmarco Veruggio, scienziato robotico e dirigente di ricerca, al CNR, che introduceva il tema dell'etica dei robot, o roboetica. Sebbene le previsioni di Gates si siano rivelate molto ottimistiche – nell'articolo si diceva che il Ministero dell'informazione della Corea del Sud puntava ad avere un robot in ogni casa entro il 2013 – il robot della SoftBank dimostra che quel momento si sta avvicinando.

Ned Snowman/Shutterstock

E inevitabilmente, con esso, il momento in cui dovremo fare i conti con le azioni dei «nostri» robot, magari quando un robot si rifiuterà di eseguire un comando perché viola le sue norme. Saremo disposti a prenderlo sul serio? Ad accettare la sua disobbedienza in nome di un principio superiore? Lo considereremo alla stregua di una «persona»? D'altro canto, sottolineano ancora Briggs e Scheutz, «anche un'eccessiva fiducia nelle capacità morali o sociali dei robot è pericolosa». Perché un robot sociale potrebbe anche essere usato «per manipolare la gente in modi che non sono mai stati possibili prima».

Forse è presto per dire quali problemi potrà comportare la nostra interazione con i nuovi robot umanoidi, ma una cosa è certa. Un'altra rivoluzione tecnologica e sociale è alle porte.

Comitato scientifico

Il problema del sesso

A richiesta con «Le Scienze» di aprile *La Regina Rossa*, un libro di Matt Ridley

Tutto sommato il sesso per la scienza è ancora un enigma. Per quanto possa sembrare bizzarro, o addirittura poco credibile, la realtà è che i ricercatori, in particolare quelli che si occupano di evoluzione, biologia, genetica e comportamento (sia umano sia di altri animali) non hanno ben chiaro perché lo facciamo. E perché lo facciano tutte quelle specie che come noi si riproducono per via sessuata. Ci sono certo ipotesi e dati sperimentali a sostegno di quadri teorici, ma a ben vedere uno dei momenti più alti della nostra esistenza rimane ancora misterioso dal punto di vista evolutivo, e pone una questione conosciuta anche come «il problema del sesso».

Basta solo considerare l'energia profusa nella ricerca e nella conquista del partner con il quale riprodursi, e quella necessaria a mantenere lo stesso partner nella propria cerchia. È uno sforzo immane, fatto di code di pavone o di combattimenti tra contendenti il cui esito può anche essere mortale. Il tutto poi per trasmettere i propri geni alla prole, per assicurarsi una discendenza che protragga nel tempo la presenza del proprio patrimonio genetico. Ed è qui uno dei punti più misteriosi delle vicenda riproduttiva. In natura sono ben noti esempi di riproduzione asessuata, in cui il genitore genera figli geneticamente identici a se stesso. Allora perché l'evoluzione non ha fatto fuori il sesso?

Una risposta estesa prova a darla il giornalista e scrittore britannico Matt Ridley in *La Regina Rossa*, il libro in edicola con «Le Scienze» di aprile. Il titolo fa riferimento a un personaggio di *Alice attraverso lo specchio*, romanzo di Lewis Carroll pubblicato nel 1871. Nel libro di Carroll, la Regina Rossa è un pezzo degli scacchi che deve correre senza sosta per rimanere però sempre nello stesso posto perché nel frattempo tutto quello che ha attorno si muove con lei. In modo simile, la riproduzione sessuata permetterebbe agli organismi di mantenere il passo con l'evoluzione dei nemici.

Il ragionamento è semplice. La lotta per la sopravvivenza non ha mai fine, possiamo dire che è un gioco a somma zero. In altre parole, se un organismo è ben adattato a un ambiente, ma i suoi nemici, per esempio virus e batteri, evolvono nuove strategie e nuove armi per sconfiggerlo, allora quell'organismo deve a sua volta evolvere difese aggiornate ed efficaci se vuole rimanere in quello stesso ambiente. Da questo punto di vista il sesso è un'ottima soluzione. La riproduzione sessuata permette il rimescolamento del materiale genetico a ogni generazione, poiché proviene da due individui diversi, e la variabilità genetica che ne risulta migliora le probabilità di sopravvivenza e dunque quelle riproduttive.

Lo sguardo di Ridley si allarga poi ai rituali e alle strategie di corteggiamento, che hanno esiti profondi sulla nostra mente. In qualità di specie che si riproduce per via sessuata, noi esseri umani siamo attratti da persone con un elevato potenziale genetico e riproduttivo; cerchiamo cioè partner sani, in forma e potenti. Si tratta della selezione sessuale, già descritta da Charles Darwin, per cui un cervo maschio è progettato per battersi con i rivali, mentre un pavone è selezionato per sedurre, per esempio. La nostra psiche non è da meno. Per Ridley è progettata per compiere azioni che aumentino la probabilità di conquistare e conservare una o più partner di alta qualità, anche se sono azioni che mettono a repentaglio la vita. La stessa intelligenza umana potrebbe essere un prodotto della selezione sessuale. Pensateci, la prossima volta che avrete a che fare con follie per amore.

fotolinchen/iStock

a cura di Giovanni Spataro

Macchine da caccia

Una tecnica di attivazione cerebrale ha trasformato topi in cacciatori spietati

Un topo mansueto può diventare un cacciatore inarrestabile. Basta usare una tecnica che sfrutta la combinazione di luce e ingegneria genetica, la cosiddetta optogenetica, per attivare a comando e in modo selettivo specifici neuroni nel cervello dei piccoli roditori (si veda *Lampi di luce sul cervello*, in «Le Scienze» n. 509, gennaio 2011), come ha dimostrato su «Cell» Ivan de Araujo, neurobiologo della Yale University. Lo scienziato e i suoi colleghi hanno attivato simultaneamente con il laser neuroni del nucleo centrale dell'amigdala che fanno parte di due vie di segnalazione: una dedicata alla caccia della preda, o meglio di oggetti in movimento, l'altra che attiva i muscoli della mandibola coinvolti nel morso. Gli effetti hanno sorpreso i ricercatori. I topi sollecitati con il laser puntavano e mordevano ogni piccolo oggetto a portata di tiro, che fossero grilli o tappi di plastica.

Verso l'Apocalisse

Destabilizzatore. L'elezione di Trump a presidente degli Stati Uniti rende il mondo un posto più insicuro.

Alla fine del mondo mancano due minuti e mezzo. Il tempo in questione è una metafora e riguarda il Doomsday Clock, l'Orologio dell'apocalisse, lanciato nel 1947 dal Bulletin of Atomic Scientists, la rivista fondata da scienziati del progetto che portò gli Stati Uniti ad avere la bomba atomica. Il rischio tuttavia è reale.

Ogni anno membri e consiglieri del Bulletin, tra i quali diversi premi Nobel, si riuniscono per spostare o meno le lancette sia in avanti sia indietro in base alla valutazione di scenari che riguardano armi atomiche, clima, uso di tecnologie e tensioni internazionali. Già il 2016 aveva visto le lancette avanzare verso le 24.00 (si veda *Tre minuti a mezzanotte*, in «Le Scienze» n. 563, luglio 2015). La mossa si è ripetuta quest'anno con uno spostamento inusuale di 30 secondi, dovuto tra l'altro all'elezione di Donald Trump a presidente degli Stati Uniti. Solo nel 1953 si era arrivati più vicino alla mezzanotte: due minuti.

Il Bulletin ha rimarcato le affermazioni di Trump nei periodi elettorale e post-elettorale sul rafforzamento e l'espansione dell'arsenale nucleare statunitense, il primo al mondo, e l'eventuale uso di quelle armi. Trump è stato citato anche per le sue posizioni sulla scienza del clima. Ad avvicinarci alla mezzanotte contribuiscono i due test nucleari della Corea del Nord effettuati nel 2016, l'azione insufficiente nell'affrontare il cambiamento climatico, i pericoli potenziali di tecnologie come quelle usate per veicolare notizie false in grado di orientare l'opinione pubblica, l'atteggiamento delle potenze nucleari: non c'è alcun segnale di ridimensionamento o smantellamento degli arsenali. E le tensioni sono in aumento.

Staminali per carie

Stop al trapano? Una terapia innovativa anticarie potrebbe sfruttare le cellule staminali della polpa dei denti.

Quando si parla di medicina rigenerativa si pensa a cellule staminali in grado di guarire l'organismo da condizioni gravi riparando tessuti danneggiati, per esempio quelli cardiaci dopo un infarto (si veda *Il futuro della medicina*, in «Le Scienze» n. 539, luglio 2013). Nella marcia verso queste terapie miliari, trattamenti con staminali per questioni meno gravi potrebbero agevolare i pazienti, per esempio quelli che devono curare carie dentali.

Lo ha dimostrato Paul Sharpe, del King's College di Londra su «Scientific Reports», che ha testato con successo una tecnica per stimolare le staminali nella polpa dentaria a ricostruire la struttura originaria dei denti. In prospettiva il risultato potrebbe portare alla sostituzione dei materiali artificiali usati oggi per otturazioni e ricostruzioni.

Grafene al silicio

Un protagonista del mondo dei materiali bidimensionali (si veda *Benvenuti a Flatlandia*, in «Le Scienze» n. 578, ottobre 2016) può contare su un nuovo e più efficace metodo di sintesi. Si tratta del silicene, un reticolo di celle esagonali ai cui vertici si trovano atomi di silicio, insomma un analogo del grafene, e proprio come quest'ultimo anche il silicene ha spessore monoatomico.

Su «ACS Nano», Maurizio De Crescenzi, dell'Università degli Studi di Roma Tor Vergata, e colleghi hanno dimostrato di aver sintetizzato monostrati di silicio su superfici di grafite cristallina. In questo modo i ricercatori hanno evitato i fenomeni di mescolamento con il substrato che invece caratterizzavano altri metodi di sintesi del silicene su substrati metallici. Grazie a misurazioni con la microscopia a scansione a effetto tunnel, gli autori hanno anche ottenuto immagini delle struttura reticolare. Il silicene allo stato puro sarà interessante per applicazioni tecnologiche, per esempio transistor, come quello già sviluppato da ricercatori dell'Istituto per la microelettronica e microsistemi del Consiglio nazionale delle ricerche ad Agrate Brianza.

di Anna Rita Longo

Uscire dal labirinto con i quanti

Filippo Caruso ha reinterpretato in chiave quantistica il vecchio problema dell'uscita dal labirinto, la cui soluzione ha ricadute su applicazioni pratiche

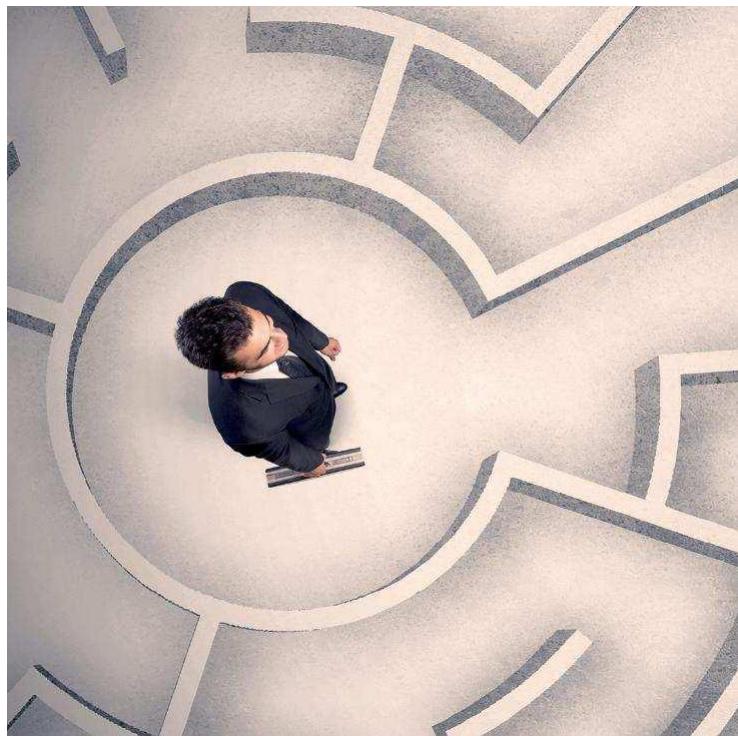
Di Filippo Caruso colpisce l'entusiasmo. Questo giovane fisico teorico dell'Università di Firenze, forte di prestigiose collaborazioni internazionali passate e in corso, parla del proprio lavoro con uno sguardo in cui balena l'orgoglio e il desiderio di comunicarne l'importanza. Di far capire che quella fisica quantistica di cui tanto – e spesso a sproposito – si parla non è un arido esercizio mentale per secchioni, ma uno tra i più fecondi settori della ricerca di base. Votato al mondo dell'infinitamente piccolo fin dagli inizi della sua carriera di ricercatore, si è fatto di recente conoscere per uno studio, pubblicato su «Nature Communications», che reinterpreta in chiave quantistica un problema vecchio quanto il mondo, che ha ispirato anche il mito: trovare la strada per uscire da un labirinto.

Affrontare un labirinto nel mondo macroscopico e in quello quantistico: qual è la differenza?

L'aspetto più affascinante della fisica quantistica è proprio il suo mettere continuamente in crisi il senso comune, la sua controintuitività. Nel mondo macroscopico una persona che si muove all'interno di un labirinto, quando giunge a un bivio, è costretta a scegliere quale via esplorare per prima tra quelle che le si aprono davanti, attendendo eventualmente di tornare dopo sui propri passi. Così non avviene nel mondo dell'infinitamente piccolo, perché un oggetto quantistico può trovarsi contemporaneamente in più punti dello spazio e quindi, nel caso del labirinto, esplorare simultaneamente più strade.

Si tratta dello stesso principio adoperato nel settore di ricerca che prende il nome di «informazione quantistica», che tenta di applicare alle tecnologie informatiche e della comunicazione la possibilità offerta dagli oggetti quantistici di svolgere più operazioni contemporaneamente. Ma fenomeni simili avvengono anche in natura: sono, per esempio, alla base della fotosintesi, come è emerso dagli studi di biologia quantistica, che hanno avuto particolare sviluppo negli ultimi anni. La particolarità della nostra ricerca, pubblicata su «Nature Communications», consiste nell'aver puntato il dito su un elemento che facilita l'individuazione dell'uscita tra le diverse strade percorse in parallelo dall'oggetto quantistico, eliminando tutti i vicoli ciechi.

Una specie di «filo d'Arianna», quindi. In che cosa consiste?

Si tratta del «rumore», quindi degli elementi di disturbo che sono la conseguenza inevitabile dell'interazione del sistema esaminato con l'ambiente circostante e sono da sempre percepiti come un problema, per esempio nel campo dell'elettronica o anche in quello dell'informazione quantistica citato prima. Il nostro studio mette in evidenza un ruolo positivo del rumore, che è in grado di identificare rapidamente le strade senza sbocco e di agevola-

CHI È

Filippo Caruso, classe 1982, è ricercatore al Dipartimento di fisica e astronomia dell'Università di Firenze, membro del Laboratorio europeo di spettroscopia non lineare e del centro di Quantum Science and Technology di Arcetri.

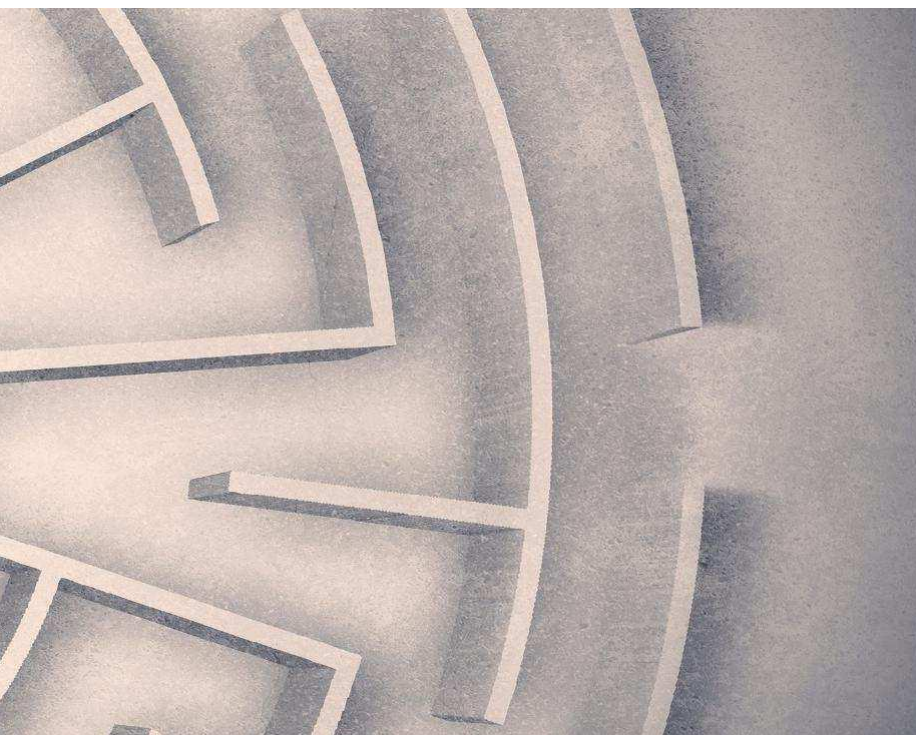
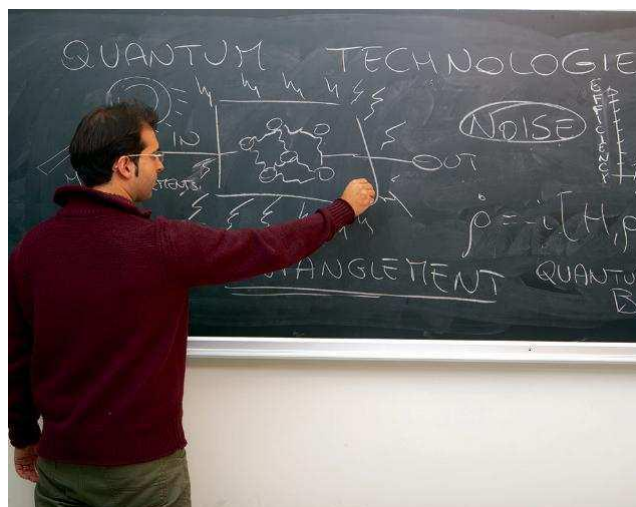
Dopo la laurea in fisica, la Scuola superiore di Catania e il dottorato alla Scuola normale superiore di Pisa (conseguiti cum laude), lavora come ricercatore all'Imperial College di Londra e a Ulm, in Germania.

Nel 2006 la Società italiana di fisica gli conferisce il premio per il miglior giovane ricercatore in fisica. Nel 2015 il Rotary International gli attribuisce il premio Majorana per il miglior giovane fisico teorico e l'Accademia dei Lincei il premio Fisica 2015.

Nonostante la giovane età, ha già al proprio attivo decine di pubblicazioni su riviste internazionali, di cui 29 come primo autore.

Cortesia Caruso (*Caruso*)

re l'individuazione dell'uscita. L'introduzione del rumore presenta anche un altro vantaggio: con un esempio tratto dal mondo macroscopico, potremmo dire che il rumore «ringiovanisce» il camminatore che cerca di fuggire dal labirinto, facendolo dirigere più velocemente verso l'uscita.

Nel caso del labirinto perfetto (quello in cui c'è una sola via d'uscita), da noi esaminato, il livello dell'efficienza con cui si esce dal labirinto aumenta di un milione di volte quando entra in gioco il rumore. Decisamente un prezioso filo d'Arianna, che avrebbe fatto comodo anche a Teseo nella sua fuga dal Minotauro.

Seguire il filo. Caruso alla lavagna mentre schematizza problemi su cui lavora e che ricordano il mitico labirinto di Teseo. Proprio come il labirinto, la soluzione segue un filo di Arianna: il rumore, cioè l'esito dell'interazione del sistema considerato con l'ambiente.

Cortesia Caruso (*Caruso*); ra2studio/Shutterstock (*labirinto*)

Possiamo già immaginarne le possibili applicazioni?

Tra quelle più immediate, senz'altro la messa a punto di celle fotovoltaiche molto più efficienti di quelle attuali, dato che trasportare energia solare è un po' come uscire da un labirinto. Ne deriverebbe un grosso vantaggio economico. Lo stesso principio può essere applicato alle tecnologie dell'informazione, permettendo di incrementare notevolmente la velocità di trasferimento dei dati. Ma come in tutti i campi della ricerca di base non è escluso che emergano importanti applicazioni che al momento ci sfuggono. Credo che limitarsi nell'esplorazione di nuove strade perché non se ne intuisce la possibile applicazione o perché, tornando ai labirinti, si ha paura di imboccare un vicolo cieco sia l'errore più grande che un fisico teorico possa fare.

Un altro problema antico è alla base anche di una recente pubblicazione del suo gruppo di ricerca. Di che cosa si tratta?

Il tutto prende le mosse da uno dei paradossi di Zenone, il celebre filosofo del V secolo a.C. che osservava come il movimento di una freccia dovesse essere impossibile, perché deriverebbe dalla somma di singoli istanti in cui l'immagine dell'oggetto è perfettamente ferma. Applicando questo paradosso al mondo quantistico, si nota come la ripetuta osservazione di un sistema lo congeli nel suo stato iniziale perché, nell'infinitamente piccolo, l'osservazione interferisce con il sistema stesso. Con un esempio un po' banale, immaginiamo una trottola che, osservata ripetutamente, si mantiene eternamente in posizione verticale, senza cadere. In un precedente studio avevamo avuto modo di osservare l'effetto Zenone quantistico; in quest'ultimo contributo, pubblicato su «Scientific Reports», siamo andati oltre.

In che modo?

Abbiamo deciso di cambiare uno dei fattori in gioco: le osservazioni del sistema sono state meno frequenti e a intervalli casuali. Di fatto abbiamo così introdotto l'elemento del rumore, attraverso questa sequenza irregolare di misure. Ma siccome il rumore può essere dovuto a elementi esterni al sistema, per esempio molecole, campi magnetici o altro, è possibile segnalarne la presenza sfruttando le proprietà quantistiche. In pratica, ci troviamo di fronte alla possibilità di realizzare veri e propri sensori basati sulle proprietà della fisica quantistica.

Tra le applicazioni più interessanti, in questo caso, c'è quella biomedica.

Sì: l'idea di base è realizzare dispositivi in grado di segnalare la presenza di elementi di varia natura, come molecole o cellule, per esempio tumorali, che sarebbe possibile rilevare attraverso l'analisi di quello che accade al sistema stesso. Si tratta però solo di una delle possibili strade da esplorare. Come dicevo, al momento possiamo intuire solo in parte i potenziali sviluppi di queste ricerche. Ma questo è proprio uno degli aspetti più stimolanti per uno scienziato.

di Letizia Gabaglio

Mettersi insieme per innovare

Il Polo GGB usa tecnologie di nuova generazione dedicate a genomica, genetica e biologia per partecipare a progetti nazionali ed esteri e vendere servizi alle aziende

Oggi la scienza non ha confini, come sanno bene quelli che la praticano ogni giorno. Perché le scoperte e i risultati ottenuti possono essere usati ovunque, perché senza collaborazioni internazionali non si riesce a raggiungere quella massa critica di finanziamenti, tecnologie, competenze che permettono di ottenere avanzamenti. La storia del Polo d'innovazione di genomica, genetica e biologia (Polo GGB), centro di alta specializzazione nel campo delle scienze della vita, lo dimostra: nato nel 2011 a Perugia da un'idea di un ricercatore italiano che a lungo ha lavorato all'estero, subito si impegna in progetti di ricerca internazionali con l'obiettivo di portare in Umbria una piattaforma tecnologica innovativa in genomica a servizio dell'università e delle aziende. Infatti proprio l'ateneo del capoluogo umbro e la Regione investono nella creazione del Polo, mentre diverse aziende del luogo decidono di entrare nella società. Realtà molto diverse fra loro – dai produttori agroalimentari ai ricercatori che lavorano con tessuti e cellule – unite dalla volontà di servirsi delle nuove opportunità date dalla genomica.

«Ad avere l'idea iniziale è stato Andrea Crisanti, oggi all'Imperial College di Londra, che con i suoi studi sulla modificazione genetica di *Anopheles gambiae* ha dato il via a un progetto molto importante, Target Malaria, che coinvolge diversi istituti internazionali con il supporto della Bill & Melinda Gates Foundation», racconta Greta Immobile Molaro, amministratore delegato del Polo GGB. «Sulla scia di questo primo progetto abbiamo ampliato il nostro network di ricerca che oggi comprende l'Università di Oxford, l'Università di Washington, l'Università di Creta e l'Institut Pasteur di Parigi», spiega.

Non solo Umbria

Il segreto del Polo sono le piattaforme di sequenziamento di nuova generazione, che permettono di eseguire analisi e test di diverso tipo: per identificare mutazioni genetiche, per analizzare l'insieme dei genomi presenti in un determinato ambiente, per studiare il trascrittoma – l'insieme dei trascritti (mRNA) – ovvero quella sola parte del genoma che codifica per la sintesi delle proteine funzionali. «Un insieme complesso e tecnologicamente all'avanguardia di servizi che il Polo mette a disposizione dei centri di ricerca coinvolti nei progetti internazionali o delle aziende che hanno necessità di condurre questo tipo di analisi», va avanti Immobile Molaro, che dopo aver ricoperto il ruolo di direttore generale di un'azienda biotecnologica di medie dimensioni, tre anni fa ha deciso di scommettere sul Polo GGB.

«Dove lavoravo prima mi sembrava di aver raggiunto l'obiettivo, qui invece c'era da raccogliere una sfida e anche un'opportunità per creare qualcosa di nuovo», racconta la manager specializzata in tecnologie agrarie e in business management.

LA SCHEDA

Polo GGB

Fatturato 2015
1,667 milioni di euro

Investimenti in ricerca
701.816,66 euro

Dipendenti/collaboratori
13 di cui 10 impiegati in R&S

Brevetti rilasciati
n.d.

Cortesia Polo GGB (*tutte le foto, in questa pagina e nella pagina a fronte*)

L'arrivo di Immobile Molaro ha portato una novità importante: il trasferimento, a giugno 2016, dell'infrastruttura dell'azienda a Siena, presso l'incubatore Toscana Life Science (TLS), dove il Polo GGB vuole ampliare, in particolare, la propria piattaforma di sequenziamento di nuova generazione e l'infrastruttura computazionale per l'analisi dei dati genomici.

«Siamo molto soddisfatti di aver trasferito la nostra infrastruttura di genomica presso la Fondazione TLS perché siamo certi di poter contare su un'ampia rete di sinergie e di offrire al territorio importanti competenze utili al contesto scientifico e sociale in cui TLS opera da tempo, oltre a proporci come partner d'elezione nell'ambito dei progetti Pharma Valley e Precision Medicine», afferma Immobile Molaro. La scienza non ha confini, e i pochi chilometri che separano Perugia da Siena non possono certo essere

Da sei anni. In questa pagina e a fronte, dispositivi ed esperimenti a cura del Polo d'innovazione di genomica, genetica e biologia nato nel 2011 a Perugia e oggi con una visione globale.

un problema. «Non abbiamo abbandonato l'Umbria: lì continuiamo con le ricerche sulla malaria, e a Terni stiamo per inaugurare il nuovo laboratorio di controllo genetico per la lotta alla malaria per lavorare con le zanzare biotech, quelle in grado di ridurre la presenza delle zanzare femmine che trasmettono la malaria», spiega l'amministratore delegato.

Un centro per le scienze della vita

Il Polo GGB è anche parte del progetto europeo INFRAVEC2, che coinvolge 20 partner che condividono piattaforme tecnologiche e infrastrutture uniche nei settori di genetica, ecologia e controllo dei vettori e include inoltre tutti i laboratori europei dotati della capacità di studiare zanzare infettate con virus in condizioni di massima sicurezza. Il consorzio INFRAVEC, finanziato per 10 milioni di euro ha l'obiettivo di creare un'unica piattaforma tecnologica europea in grado di fornire ai singoli ricercatori e ai laboratori gli strumenti utili a studiare la biologia delle zanzare e adottare nuove misure di controllo del vettore.

In Toscana i ricercatori del Polo trovano aziende importanti come GSK Vaccines, che proprio a Siena ha sviluppato tecnologie innovative e prodotto vaccini unici nel loro genere, con cui stringere accordi, e programmi di incentivi alla ricerca e sviluppo che impegnano la Regione Toscana a fare di TLS un centro strategico per le scienze della vita. Diversi i progetti di ricerca già avviati con università toscane: insieme a quella senese e all'Ospedale Le Scotte di Siena, Immobile Molaro e collaboratori stanno mettendo a punto un test per la diagnosi del morbo di Paget, una malattia rara osteoarticolare; con l'Istituto superiore di Sanità lavorano alla genotipizzazione di *Salmonella* Typhi e Paratyphi per sviluppare un test che in tempi brevi riesca a individuare il patogeno in diversi tipi di campione; con l'Università di Firenze è in atto un progetto per risolvere il problema del fattore di istocompatibilità, elemento chiave per ridurre il rischio di rigetto nei trapianti, grazie a un sequenziatore di nuovissima generazione.

«Usiamo una tecnologia innovativa che permette di leggere sequenze molto lunghe e di farlo velocemente e in maniera molto semplice: tutta la tecnologia è racchiusa in uno strumento delle dimensioni di una chiavetta USB che si collega a un computer», spiega ancora Immobile Molaro. Una macchina in miniatura che il Polo GGB ha acquisito negli ultimi mesi e che lo pone all'avanguardia in Italia. «Ma il nostro segreto non sono solo le tecnologie, sono le persone e le competenze che possiamo mettere in gioco. Nel nostro lavoro sono fondamentali il controllo di qualità dei campioni e la scelta ottimale dei processi di lavoro e di reagenti per manipolare il campione, e solo a questo punto si lavora per ottimizzare il sequenziamento. Le macchine da sole non bastano», conclude l'amministratore.

di Elena Castellani
professore associato, Dipartimento di filosofia,
Università di Firenze

Fisica e libertà

Quello che la fisica può o non può dirci riguardo alla questione del libero arbitrio

Se la fisica fosse perfettamente deterministica, nel senso che ciò che succede a un dato istante segue necessariamente da quanto lo ha preceduto, noi come esseri fisici, e quindi soggetti alle leggi della natura, saremmo liberi nelle nostre azioni o queste sarebbero anch'esse già determinate? Tale, in sostanza, è la questione che si pone nell'opinione comune rispetto al rapporto tra fisica e libero arbitrio.

Il libero arbitrio ha che fare con la capacità dell'agente di decidere le proprie azioni – da cui anche il nesso con la questione della responsabilità morale. In particolare, questa libertà si esplica nell'idea di poter fare altrimenti rispetto all'azione che compiamo: una capacità che tutti sentono istintivamente di possedere (assumendo che non ci siano costrizioni esterne d'altra natura). L'idea che la fisica possa dirci qualcosa contro questa libertà viene quindi avvertita come un problema, rispetto a cui si contrappongono nella discussione filosofica due tipi di posizioni, a seconda che si argomenti a favore o contro la compatibilità del libero arbitrio con il determinismo fisico.

La discussione coinvolge più ambiti disciplinari, dalla fisica alle neuroscienze all'etica, e diversi temi (determinismo, causalità, prevedibilità, emergenza e così via) e merita, anche per questo, di essere condotta in modo attento e approfondito. In particolare, già nella seconda metà dell'Ottocento si sapeva per esempio, grazie ai lavori di Maxwell, Poincaré e altri, che determinismo e prevedibilità non sono la stessa cosa, a differenza di quello che pensava Laplace, il «padre» del determinismo classico. Nel Novecento poi, con la formulazione della meccanica quantistica si è capito che la fisica non è tutta deterministica. È quindi opportuno specificare rispetto a quale ambito della fisica ci si pone il problema, e che influenza questo ambito possa avere sulle considerazioni relative al libero arbitrio. Si sa, infine, che noi siamo sistemi molto complessi, dotati di coscienza, e che possediamo, in quanto esseri coscienti, molte proprietà «emergenti» rispetto alle nostre caratteristiche fisiche: aspetti emergenti tra cui possiamo includere, appunto, la nostra facoltà di agire.

Per molti queste considerazioni sono sufficienti per liquidare quello che risulterebbe così uno pseudo-problema, nato da una questione apparentemente mal posta. Secondo questa posizione, il fatto che la fisica dei costituenti del nostro corpo sia deterministica o indeterministica non ha influenza sulla nostra capacità di agire liberamente, che è un aspetto emergente rispetto al livello fisico dei nostri costituenti microscopici. Un modo di pensare che è ben illustrato dalla risposta che dà sulla realtà o meno del libero arbitrio il fisico Sean Carroll del California Institute of Technology, in un'intervista che fa parte di una serie in cui vengono intervistati scienziati, filosofi e teologi (https://www.closertotruth.com/series/physics-free-will) sulle cosiddette «Big Questions».

Determinismo e prevedibilità non sono la stessa cosa, com'è noto già dal XIX secolo. (*Sopra*, Henri Poincaré)

Il libero arbitrio, dice Carroll, esiste come esiste per esempio la temperatura. Entrambi sono infatti aspetti «emergenti» rispetto al livello «più fine» dei moti molecolari: le molecole non sono calde o fredde di per sé, ma lo sono i nostri corpi; allo stesso modo, i moti delle particelle che ci compongono seguono determinate leggi, ma questo non vuol dire che le medesime leggi regolino le nostre azioni.

Pur andando in questa direzione, la questione è magari un po' più complessa e Carroll stesso ammette che vada posta ai filosofi, piuttosto che ai fisici. L'approfondimento dei concetti implicati e la ricostruzione di tutti i nessi che contraddistinguono un essere cosciente, che agisce nel mondo fisico e in relazione con gli altri, è infatti un compito genuinamente filosofico, per quanto condizionato da quello che dice la scienza riguardo a ciò che le compete.

Lo dimostra benissimo la filosofa Jenann Ismael dell'Università dell'Arizona nel suo libro *How physics makes us free* del 2016, dedicato appunto al compito di risolvere l'apparente conflitto tra ciò che la fisica dice e ciò che noi sentiamo istintivamente riguardo alla nostra capacità di agire. Un conflitto che può essere risolto solo se si fa chiarezza su «che cosa siamo noi, come rientriamo nell'ordine naturale e come possiamo collocare le nostre azioni in quest'ordine»: cioè come emergono – e a quale livello di complessità – le persone consapevoli e capaci di agire, in un mondo «in cui non ci sono binari che costringono in modo ferreo i nostri comportamenti, ma solo regolarità emergenti e creature complesse che sfruttano tali regolarità per scopi strategici.»

di Edoardo Boncinelli
Università Vita-Salute San Raffaele, Milano

Il gene che fa la differenza

Un gene di muscoli e ossa dei mammiferi è cruciale per il cervello dei primati

Una volta si diceva che i neuroni, le cellule nervose del cervello, vivono molto a lungo, sono quasi sempre gli stessi per tutta la vita e, se muoiono, non c'è più nulla da fare. Non si recuperano. Sappiamo da tempo che questo non è del tutto vero e che, anzi, certi gruppi di neuroni sono generati durante l'intera vita, in diverse regioni cerebrali e per scopi diversi.

Il caso più clamoroso è rappresentato da alcuni neuroni generati *de novo* nell'ippocampo, la regione cerebrale in cui avviene la prima registrazione dei ricordi. Si è scoperto da qualche anno, non senza sorpresa, che la fissazione dei ricordi richiede appunto la produzione di gruppi di nuovi neuroni, che avviene in ondate temporalmente definite. Sembra anzi che conoscenze acquisite nell'ambito di una stessa ondata di nuovi neuroni ippocampali restino poi per sempre in qualche modo «associate» fra di loro. Quando si apprendono cose nuove, oltre la produzione di nuovi neuroni si osserva anche una grande ristrutturazione di alcuni dei vecchi e la creazione di nuovi contatti fra neuroni, detti contatti sinaptici.

Nel cervello devono quindi accadere tante cose in ogni momento, ma soprattutto quando si imparano nozioni nuove. Questo è sempre vero, ma lo è particolarmente per noi e per le grandi scimmie, nostre strette parenti. Appare dunque assai significativo che si sia scoperto (Bulent Ataman e collaboratori, in «Nature», Vol. 539, pp. 242-247) un gene che sembra causare qualcosa di simile nel cervello dei primati, cioè delle scimmie e nostro, ma non in quelli degli altri mammiferi.

Al microscopio. Il tessuto dell'ippocampo: in rosso i nuclei delle cellule nervose, in blu i neurofilamenti, in verde le cellule della glia.

Thomas Deerinck, NCMIR/Science Photo Library/AGF

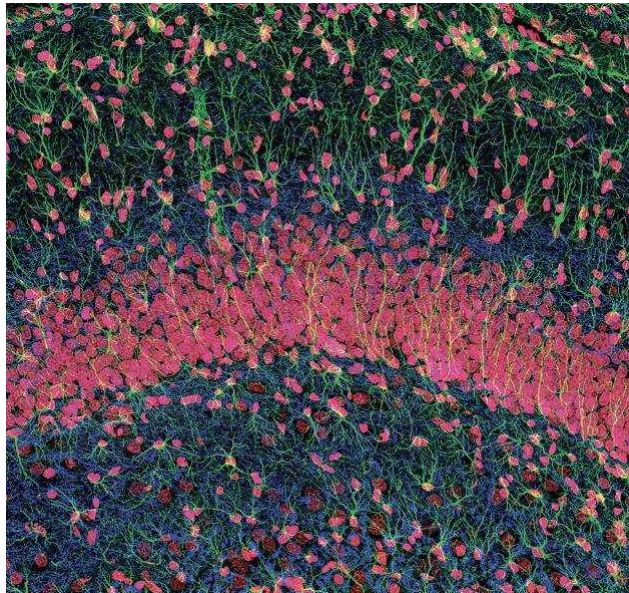
Si tratta del gene della osteocrina, una proteina secreta, che stimola indirettamente l'attivazione di altri geni, soprattutto nei periodi nei quali necessita la produzione e il rimodellamento di nuove cellule nervose. Questo gene è attivo soprattutto nei muscoli e nelle ossa di tutti i mammiferi, comprese le proscimmie, ma nelle scimmie e nell'essere umano risulta attivo anche nel cervello, soprattutto quando il cervello sta imparando qualcosa.

È stato difficile individuarlo, come immaginerete facilmente, ma i risultati sono molto promettenti. In un primate che sta imparando qualcosa, alcuni neuroni dell'ippocampo si attivano e cominciano ad accendere alcuni geni specifici, alcuni subito, per esempio entro un'ora dall'evento, alcuni dopo qualche ora. Tra questi ultimi è stato individuato anche il gene della osteocrina, che in altri mammiferi è attivo solo nel muscolo e nel tessuto osseo in via di rigenerazione. Questo stesso gene è attivo nella corteccia cerebrale umana, e l'intensità della sua attività è regolata da specifici eventi cerebrali.

Nel cervello dei primati la sua attivazione è sotto il controllo di una specifica regione di DNA (detta MRE) a cui si lega uno specifico complesso di proteine regolatrici che lo attivano. Ebbene, la regione MRE, 85 nucleotidi in tutto, è assente nel gene che si trova nei mammiferi diversi dalle scimmie e nel loro cervello il gene dell'osteocrina non si attiva proprio. Se si modifica il gene presente nei primati, eliminando la sua regione MRE, quello non si attiverà più nelle cellule del cervello, ma solo in altre. Si tratta quindi di un meccanismo evolutivo molto interessante.

Non è un gene che è cambiato, ma una sua specifica regione regolatrice, che è presente nei primati e assente negli altri mammiferi. Non è la prima volta che si osserva qualcosa del genere, ma è bene comunque rimarcarlo per sottolineare come possono essere sottili e quasi subdoli i cambiamenti evolutivi.

L'osteocrina prodotta dal nostro gene nel cervello dei primati attiva a sua volta molti altri circuiti genici, necessari per la replicazione e la modificazione di specifici neuroni nel cervello in attività, soprattutto nel momento dell'apprendimento. La loro azione si esplica soprattutto nella regolazione delle ramificazioni dendritiche dei bottoni sinaptici che permettono il contatto tra neuroni diversi. Si rafforza così il concetto secondo cui l'apprendimento è in buona parte mediato dalla modificazione dei diversi contatti sinaptici.

Questo risultato può essere considerato un altro importante passo verso la comprensione delle differenze significative che intercorrono fra il nostro cervello e quello degli altri animali, ai quali pure il cervello non manca.

di Piergiorgio Odifreddi
professore ordinario di logica matematica all'Università di Torino
e visiting professor alla Cornell University di Ithaca (New York)

Le radici della fotografia

Un breve percorso storico tra geometria e matematica delle macchine fotografiche

Esattamente un millennio fa l'arabo Alhazen produsse una monumentale *Ottica* in sette volumi in cui, fra le altre cose, istituì un parallelo tra l'occhio umano e la macchina fotografica (anche se lui faceva riferimento a quella sua antesignana che fu la camera oscura): la pupilla corrisponde al foro dell'obiettivo, il cristallino alla lente focalizzante, l'iride al diaframma, la palpebra all'otturatore e la retina alla pellicola.

In realtà, come è tipico delle lenti, il cristallino mette a fuoco l'immagine soltanto su una piccola area della retina, chiamata fovea: per focalizzare tutta l'immagine è necessaria una continua serie di veloci oscillazioni dell'occhio, le «saccadi». E il motivo per cui non ci viene il mal di mare guardando, come invece ci viene se muoviamo velocemente la testa a occhi aperti, è perché durante ciascun movimento inconscio degli occhi il cervello effettua una «soppressione saccadica» che inibisce la percezione ottica.

La visione è dunque l'analogo di un film costituito da una successione di istantanee, ciascuna scattata con un particolare tempo di esposizione e una particolare apertura dell'iride, che nelle macchine fotografiche corrisponde all'apertura del diaframma. La quantità di luce che entra nell'obiettivo dipende dalla combinazione dei due elementi, ma non in maniera univoca: la stessa quantità di luce si può ottenere con diverse combinazioni, che vanno da un diaframma più aperto e un'esposizione più breve a un diaframma più chiuso e un'esposizione più lunga.

Analogamente, in geometria la stessa ipotenusa di un triangolo rettangolo si può ottenere con diverse combinazioni di cateti: precisamente, tutti quelli che corrispondono a un vertice situato sul cerchio avente per diametro l'ipotenusa data. E in relatività lo stesso intervallo spazio-temporale si può ottenere con diverse combinazioni di distanze spaziali e durate temporali: precisamente, tutte quelle che corrispondono a un vertice situato sull'iperbole avente per distanza focale l'intervallo dato.

L'analogia fra i due esempi citati deriva dal fatto che nella relatività lo spazio è iperbolico, anziché euclideo, e l'espressione che determina la distanza è una differenza di quadrati, anziché una somma. L'analogia con la fotografia deriva invece dal fatto che l'apertura del diaframma determina una superficie spaziale, e l'esposizione una durata temporale.

Nel 1954 le maggiori industrie fotografiche adottarono la definizione di «valore di esposizione» proposta da Friedrich Deckel, come logaritmo in base 2 del rapporto tra la superficie di apertura del diaframma e il tempo di esposizione: $VE = log_2 A/T$. Il valore di esposizione 0 corrisponde a un rapporto A/T pari a 1, stabilito come la quantità di luce che entra nell'obiettivo completamente aperto in un secondo. L'uso del logaritmo in base 2 fa sì che, a ogni incremento unitario del valore di esposizione, se l'apertura rimane costante, il tempo si dimezzi, e se il tempo rimane costante, l'apertura si dimezzi. Per esempio, il valore di esposizione 1 corrisponde a un obiettivo tutto aperto per mezzo secondo, o a un obiettivo mezzo aperto per un secondo.

Sessant'anni e più. Nel 1954 le industrie fotografiche adottarono una definizione di valore di esposizione.

A obiettivo tutto aperto la sequenza crescente dei valori di esposizione 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, eccetera, corrisponde dunque teoricamente a tempi decrescenti pari a 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64, 1/128, 1/256, eccetera. In pratica per comodità si arrotondano questi valori a 1/2, 1/4, 1/8, 1/15, 1/30, 1/60, 1/125, 1/250, eccetera.

Analogamente, a obiettivo aperto per un secondo la sequenza crescente dei valori di esposizione corrisponde a superfici decrescenti del diaframma. Ma, essendo scomodo lavorare direttamente con le superfici, si lavora indirettamente con i quadrati dei diametri: per dimezzare la superficie bisognerà dunque dividere il diametro per la radice di 2, che è pari a circa 1,4. Le aperture decrescenti del diaframma corrisponderanno dunque teoricamente a divisioni per le potenze della radice di 2, cioè 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11.2, 16, eccetera, e in pratica a divisioni per 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16, eccetera.

Un diaframma 2.8 e un tempo di 1/125, per esempio, sono equivalenti come valore di esposizione a un diaframma 4 e un tempo 1/60. Ma le rispettive fotografie no, perché aumentando il diaframma si riduce la profondità di campo della messa a fuoco, e aumentando il tempo si aumenta l'effetto mosso: due aspetti indipendenti che non si possono controllare simultaneamente, per una sorta di «principio di indeterminazione» fotografico.

di Amedeo Balbi
Astrofisico, ricercatore al Dipartimento di fisica
dell'Università di Roma Tor Vergata

Tra materia e antimateria

Un risultato del CERN potrebbe risolvere una delle questioni aperte della fisica

Di tanto in tanto la fisica ci costringe a dover accettare che l'universo è fatto in modo sorprendente. Tra le tante stranezze che nessuno avrebbe mai sospettato, prima di sbatterci il naso contro, una delle più grosse è senza dubbio l'esistenza dell'antimateria: ovvero il fatto che ogni particella di materia debba avere un gemello di massa identica ma di carica elettrica opposta. La ragione per cui questa cosa ci sembra bizzarra è che, nell'esperienza quotidiana, non abbiamo mai a che fare con l'antimateria: e meno male, perché quando materia e antimateria si incontrano il risultato è la scomparsa di entrambe, accompagnata dalla produzione di una straordinaria quantità di energia (esattamente pari alla massa delle particelle coinvolte, moltiplicata per il quadrato della velocità della luce, secondo la ben nota formula einsteiniana).

Viviamo dunque in un mondo fatto di sola materia, il che però tira in ballo un'altra questione, ancora più bizzarra, e cioè: che fine ha fatto tutta l'antimateria? Per come capiamo la faccenda, negli istanti iniziali l'universo doveva contenere materia e antimateria in parti uguali, tranne che per una lievissima disparità: più o meno, per ogni miliardo di coppie particella-antiparticella che si cancellavano trasformandosi in pura energia c'era una particella spaiata. Questo minuscolo scarto ha fornito il materiale di costruzione per il mondo come lo conosciamo.

Ma, appunto, a che cosa è dovuto lo scarto? Non lo sappiamo, ed è una delle grandi questioni irrisolte della fisica. La cosa è resa ancora più enigmatica dal fatto che l'antimateria sembra comportarsi in maniera pressoché identica alla sua controparte «normale», cioè quella di cui siamo fatti noi e tutto quello che ci circonda. Per esempio, alla fine dello scorso anno la collaborazione ALPHA al CERN di Ginevra ha annunciato di aver misurato per la prima volta lo spettro della luce emessa da atomi di antidrogeno (lo studio è stato pubblicato su «Nature» il 26 gennaio). Naturalmente si è trattato di una misurazione di incredibile difficoltà, perché per studiare gli antiatomi bisogna tenerli confinati senza che vengano in contatto con la materia ordinaria. A ogni modo, almeno per quanto riguarda l'interazione con la luce, l'antidrogeno sembra comportarsi come l'idrogeno, con una precisione di due parti su 10 miliardi.

Più o meno simultaneamente la collaborazione BASE, sempre del CERN, ha pubblicato su «Nature Communications» una misura del momento magnetico dell'antiprotone (una proprietà che può essere esemplificata immaginando una carica elettrica in rotazione sul proprio asse) e ha mostrato che è identico a quello del protone, con una precisione di 0,8 parti per milione.

Dunque, se esistono differenze in grado di spiegare la preferenza della natura in favore della materia, devono essere davvero nascoste bene. Ma forse il segnale tanto cercato potrebbe essere appena venuto alla luce. Sempre al CERN, la collaborazione LHCb avrebbe osservato per la prima volta una differenza apprezzabile nel decadimento degli antibarioni rispetto ai barioni. Per capirci, i barioni sono una classe di particelle formate da tre quark, la stessa di cui fanno parte anche protoni e neutroni, e quindi hanno un'importanza particolare: l'universo, in sostanza, è fatto di barioni (almeno per quanto riguarda la componente direttamente visibile: materia ed energia oscure sono un discorso a parte).

Il risultato di LHCb, pubblicato *on line* su «Nature» il 30 gennaio, non ha ancora la significatività statistica che i fisici ritengono indispensabile per proclamare una scoperta (i famosi «5 sigma»), ma è comunque molto incoraggiante: se sarà confermato, potremmo essere sulla strada giusta per capire finalmente un po' meglio una delle grandi stranezze dell'universo.

Luce sull'antimondo. Diversi esperimenti condotti al CERN di Ginevra, come per esempio la collaborazione ALPHA, stanno facendo luce sulle proprietà di atomi e particelle di antimateria.

Cortesia Jacques Hervé Fichet/CERN

di Giorgio Manzi
Insegna paleoantropologia presso il Dipartimento di biologia ambientale dell'Università «La Sapienza» di Roma, dove dirige il Museo di antropologia «Giuseppe Sergi»

Una diversità di orecchio

Le ossa dell'udito dei Neanderthal sono diverse da quelle della nostra specie

Sono le ossa più piccole del nostro corpo: martello, incudine e staffa. Compongono una catena funzionale di ossicini, che trasmette e modula i segnali acustici dalla membrana del timpano agli organi più interni dell'orecchio, in particolare alle cellule sensoriali della coclea. Queste, a loro volta, trasmettono il segnale ai centri specializzati del cervello, dove la recezione dell'onda sonora che aveva raggiunto le membrana del timpano e l'aveva fatta vibrare diventa infine una consapevole percezione uditiva.

Sono elementi importanti per lo studio dell'udito anche nelle specie estinte, con possibili inferenze sulla produzione e ricezione di segnali acustici e, nel nostro caso, sulle modulazioni del linguaggio articolato. Difficile però trovare ossa così piccole e fragili nella documentazione fossile (anche se qualcosa abbiamo già visto nella rubrica di luglio 2013).

Tuttavia, un gruppo del Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie di Lipsia ha sottoposto a tomografia ad alta risoluzione diversi crani di Neanderthal e ha trovato un buon numero di ossicini dell'udito, ancora inglobati nell'orecchio medio. Si tratta della collezione più grande del suo genere e include reperti di varia antichità e provenienza: Neanderthal arcaici da Croazia, Germania e Francia, «classici» dalla stessa Francia, un paio del Vicino Oriente. Li hanno analizzati a fronte di un campione della nostra specie, con reperti sia pleistocenici sia più recenti, e confrontati anche con gorilla e scimpanzé.

Con sorpresa, hanno potuto verificare che gli ossicini dei Neanderthal sono morfologicamente distinti dai nostri; e neanche poco. La distanza, espressa da un'analisi multivariata su dati di morfometria geometrica, è piuttosto sorprendente. Ci sono più differenze fra noi e loro (che ci siamo separati intorno a mezzo milione di anni fa) di quante ce ne siano fra gorilla e scimpanzé, che hanno un passato in comune che risale a più di otto milioni di anni dal presente.

È un po' come capita con tutto lo scheletro. In entrambi i casi si tratta pur sempre di anatomia umana, ma a guardar bene quella dei Neanderthal è inequivocabilmente l'anatomia di una specie differente, quella di un'altra specie umana: simile a noi, ma non identica. A volte le differenze sono sorprendentemente elevate. È proprio quanto si evince, ancora una volta, dalle immagini e dai risultati di questo studio pubblicato di recente su «Proceedings of the National Academy of Sciences».

Ci si potrebbero allora aspettare differenze anche dal punto di vista funzionale, del tipo: non sarà che i Neanderthal avevano un udito differente dal nostro? Niente affatto. Nonostante le diverse morfologie, i parametri funzionali rilevati sono in larga parte simili tra noi e loro. Una somiglianza sorprendente se si prendono in esame le caratteristiche biomeccaniche di ciascun ossicino, mentre dobbiamo concludere che le differenze osservate, una volta prese nel loro insieme, tendono a compensarsi fra loro.

Perché così diversi, allora? La risposta sembra risiedere nel particolarissimo assetto che assume nei Neanderthal la base cranica, al cui interno alloggiano le strutture uditive. Sappiamo che il cranio di questi nostri parenti estinti è il risultato di una combinazione fra un estremo sviluppo encefalico e il mantenimento di una struttura ancora arcaica delle ossa della volta cranica. Nella nostra specie, invece, un'analoga (quantitativamente analoga) espansione encefalica si è associata a un globale nuovo arrangiamento dell'architettura del cranio nel suo insieme. A cascata ciò ha comportato differenze significative nell'assetto delle strutture dell'orecchio nelle due specie. A queste gli ossicini avrebbero risposto, a loro volta modificandosi, proprio per mantenere inalterata la funzionalità del sistema.

Dentro la testa. Una tecnica tomografica applicata a crani di Neanderthal (*sinistra*) ha permesso di confrontare le ossa dell'udito di questa specie con quelle della nostra (*destra*).

BIOLOGIA SINTETICA

Il batterio con il DNA artificiale

Prodotto in laboratorio un microrganismo con un codice genetico ampliato

Più di quattro. Un ceppo di *Escherichia coli* è stato modificato in modo che il suo DNA contenesse, oltre ai quattro nucleotidi – le lettere con cui è scritta l'informazione genetica della vita –presenti in natura, anche due nucleotidi sintetici.

Ktsdesign/Science Photo Library/Getty Images

Il codice genetico si può ampliare. Da miliardi di anni, l'informazione genetica di ogni organismo sulla Terra è scritta con un codice di quattro lettere, i quattro nucleotidi del DNA. Ma Floyd Romesberg, dello Scripps Research Institute di La Jolla in California, e colleghi hanno creato un batterio che usa due lettere in più: due nucleotidi sintetici, che si accoppiano a formare un paio di basi non naturale.
Un ceppo di *Escherichia coli* il cui DNA contiene una coppia aggiuntiva di nucleotidi, in realtà, era già stato creato dal gruppo di Romesberg nel 2104. Ma cresceva male e, soprattutto, replicandosi finiva per perdere i nucleotidi sintetici e riacquistare un genoma ordinario. Perciò Romesberg e colleghi ci hanno lavorato per migliorarne la crescita e rendere più stabili i nucleotidi non convenzionali, e ora presentano i frutti del lavoro sui «Proceedings of the National Academy of Sciences».

Il batterio, per esempio, era stato dotato di un trasportatore di membrana che fa entrare nella cellula i nucleotidi sintetici. Il gruppo di Romesberg ha modificato l'espressione e la funzione di questo trasportatore per accelerare sia l'importazione dei nucleotidi, favorendone il mantenimento, sia la crescita del batterio. Inoltre i ricercatori hanno un po' modificato chimicamente la coppia di nucleotidi, per renderla più efficiente nel replicarsi. Infine, con ulteriori modifiche genetiche, hanno fatto sì che il batterio demolisca le eventuali sequenze di DNA che perdono i nucleotidi sintetici.

Questo batterio cresce quasi come quello non modificato e ha mantenuto pressoché senza perdite i nucleotidi sintetici per 60 replicazioni. È quindi il primo organismo semisintetico capace di proliferare con un DNA non naturale. «Un punto di partenza – dicono gli autori – verso una meta fondamentale della biologia sintetica: creare organismi con tratti e funzioni inesistenti in natura, utili a produrre farmaci o nuovi materiali».

Per ora i nucleotidi aggiuntivi vengono solo replicati ma non letti e quindi non veicolano alcuna informazione. Il prossimo passo sarà quindi dotare il batterio della capacità di leggerli, iniziando con il produrre proteine inesistenti in natura.

La prospettiva rinnova ovviamente i timori che batteri simili sfuggano dal laboratorio, con conseguenze imprevedibili per l'ambiente e la salute. Si studiano da tempo vari meccanismi di sicurezza che prevengano simili fughe, rendendo i batteri incapaci di vita autonoma, e Romesberg su questo si dice tranquillo: i due nucleotidi sintetici non esistono in natura e sono molto diversi da quelli ordinari, e se il batterio non li riceve da una fonte esterna muore subito. È quindi estremamente difficile che, con una catena di mutazioni casuali, divenga capace di produrli in autonomia.

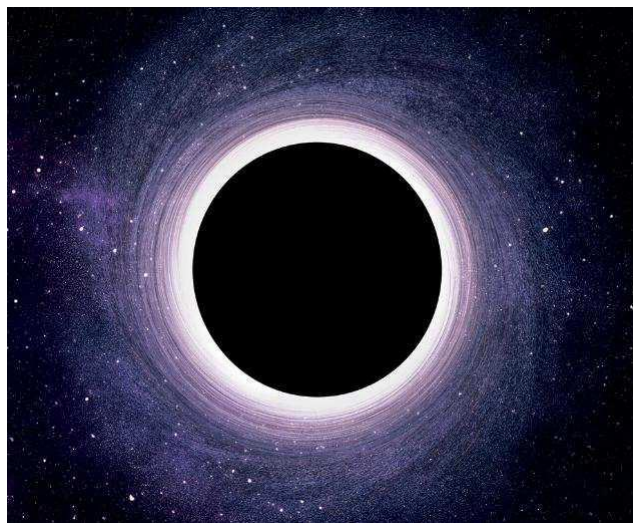
Giovanni Sabato

FISICA

L'evaporazione di un buco nero

Descritto un apparato sperimentale per riprodurre l'evaporazione di questo oggetto celeste

Simulare in laboratorio le fasi finali dell'evaporazione totale di un buco nero per risolvere il paradosso dell'informazione: è questa l'idea di Pisin Chen, della National Taiwan University di Taipei, e Gerard Mourou, dell'École Polytechnique di Palaiseau, in Francia. La proposta, pubblicata su «Physics Review Letters», è solo teorica, ma i due fisici hanno anche descritto un possibile apparato sperimentale per metterla alla prova.

All'origine del paradosso dell'informazione dei buchi neri c'è il fenomeno della radiazione di Hawking, secondo cui un buco nero nel tempo perde materia (e quindi energia). Il processo chiama in causa le fluttuazioni quantistiche del vuoto che avvengono in prossimità dell'orizzonte degli eventi. Il loro effetto è la creazione di coppie virtuali di particella e antiparticella, che possono diventare reali in presenza dell'intenso campo gravitazionale del buco nero. Se un membro della coppia cade nel buco nero, ma l'altro riesce a sfuggire, il risultato netto è la perdita di una certa quantità di massa e di energia da parte del buco nero. Questo processo, nel corso di miliardi di anni, porta alla totale evaporazione del buco nero.

Una particella, tuttavia, porta con sé anche informazione, legata al suo stato fisico. La caduta nel buco nero sembrerebbe condurre alla perdita totale di informazione, mentre questa, secondo il principio di unitarietà della meccanica quantistica, dovrebbe invece conservarsi. Da qui il paradosso, ancora oggi in attesa di una soluzione sperimentale.

Per risolverlo, Chen e Mourou hanno pertanto ipotizzato un esperimento da laboratorio, che simula l'evaporazione finale di un buco nero, con il rilascio completo e definitivo dell'energia (e dell'informazione) in esso contenuto. L'idea è usare coppie di fotoni correlati (*entangled*), uno come radiazione di Hawking, l'altro come controparte intrappolata, ma poi riemessa nell'evaporazione finale. L'osservazione della correlazione fra i due fotoni al termine del processo sarebbe la prova definitiva della conservazione dell'informazione e la soluzione del paradosso.

Emiliano Ricci

Nessuna traccia (ancora) di materia oscura

La materia oscura, che contribuisce con quasi il 27 per cento a tutta la materia-energia contenuta nell'universo, resta ancora invisibile: anche l'ultima ricerca in ordine di tempo, quella dell'esperimento LUX (che sta per Large Underground Xenon), ha infatti dato esito negativo. I risultati della collaborazione internazionale, che ha lavorato presso i laboratori sotterranei della Sanford Underground Research Facility, a Lead, negli Stati Uniti, confermano quindi gli esiti di altri recenti esperimenti, che puntano a rilevare un particolare tipo di particelle di materia oscura, dotate di massa, ma debolmente interagenti con la materia ordinaria (le cosiddette WIMP, da *weakly interacting massive particles*).

Le WIMP sono previste da un'estensione del modello standard, che descrive le particelle fondamentali e tre delle quattro forze che agiscono in natura, nota come supersimmetria, secondo cui a ogni particella ordinaria corrisponde un partner supersimmetrico. Ma nonostante non si abbia nessuna conferma sperimentale dell'esistenza di particelle supersimmetriche (anche le ricerche con LHC al CERN di Ginevra finora non hanno dato esiti positivi), fisici e cosmologi continuano a progettare esperimenti orientati alla rilevazione di WIMP.

L'esperimento LUX, i cui risultati sono stati pubblicati sulle «Physical Review Letters», è caratterizzato da un contenitore sotterraneo di 370 chilogrammi di xenon liquido e gassoso (di cui 250 chilogrammi di xenon liquido ultrapuro). L'interazione fra WIMP e xenon può produrre fotoni ultravioletti o elettroni liberi, che poi, attraverso l'applicazione di campi elettrici, vengono indotti a produrre fotoni secondari. I fotoni vengono quindi rivelati da due schiere di fotomoltiplicatori posti sopra e sotto il contenitore, detto camera a proiezione temporale. Ricostruendo le traiettorie seguite dai fotoni, è possibile stabilire quanti e quali sono frutto dell'interazione con le WIMP. Malgrado l'estrema sensibilità dell'esperimento LUX, non si ha ancora nessuna prova delle WIMP. Ma saranno i rivelatori di prossima generazione a dirci se l'ipotesi WIMP è definitivamente da abbandonare.

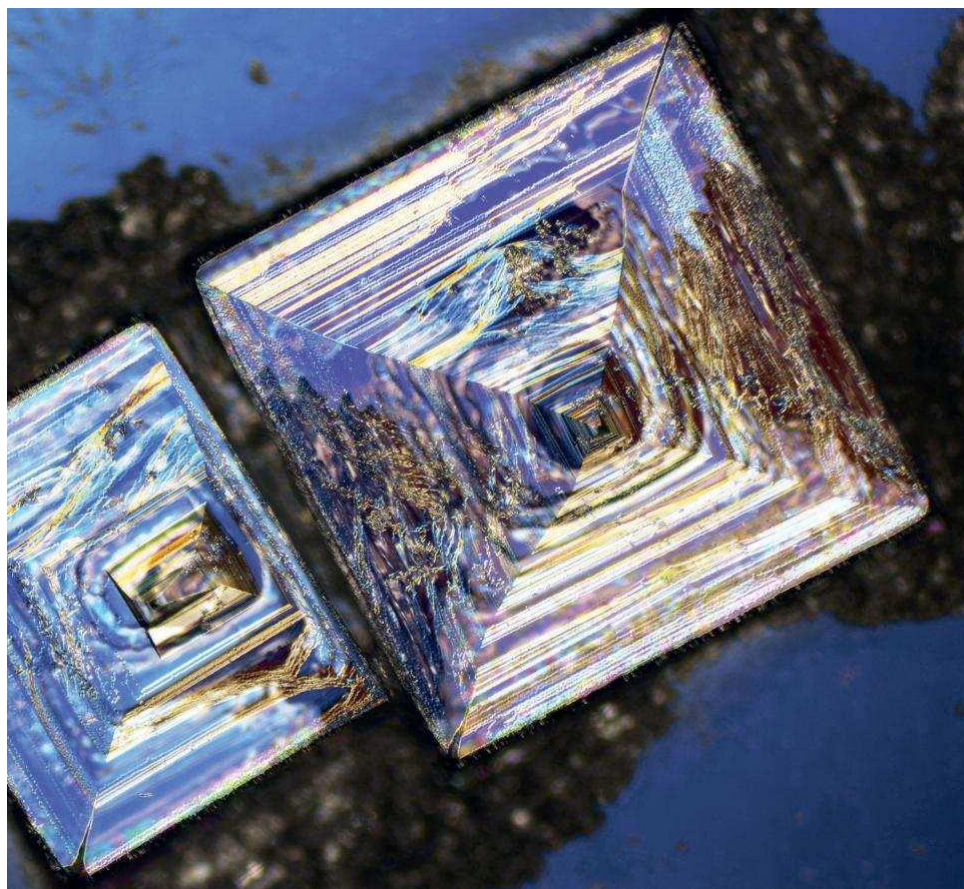
Emiliano Ricci

vchal/iStockphoto (*buco nero*); cortesia Matt Kapust, Sanford Underground Research Facility (*rivelatore materia oscura*)

FISICA

Ritratto di un cristallo spazio-temporale

Definiti i metodi per misurare proprietà e cambiamenti di fase in queste strutture periodiche

Science Photo Library/AGF

I cristalli spazio-temporali sono strutture periodiche non soltanto nello spazio, come i normali cristalli, ma anche nel tempo. Teorizzati per la prima volta nel 2012 dallo statunitense premio Nobel per la fisica Frank Wilczek, rappresentano concettualmente l'estensione dell'idea di un materiale a quattro dimensioni: una struttura di particelle che, spostandosi, torna periodicamente alla sua configurazione iniziale. Poter manipolare e controllare materiali di questo tipo, che rompono specifiche condizioni di equilibrio, rappresenterebbe una vera e propria rivoluzione nel campo dell'elettronica quantistica.

Ora, per la prima volta – sulla base di due studi effettuati parallelamente alla fine dello scorso anno all'Università del Maryland e alla Harvard University – all'Università della California a Berkeley sono stati definiti con esattezza i metodi per misurare proprietà e cambiamenti di fase di un cristallo spazio-temporale.

Gli scienziati dell'Università del Maryland erano riusciti a mettere a punto in laboratorio una catena monodimensionale di dieci ioni itterbio, osservandoli comportarsi come elettroni con spin interagenti tra loro dopo averli portati in non equilibrio con campi magnetici generati da laser. Rompere la simmetria spaziale, a livello quantistico, significa che gli elettroni possono formare cristalli che non rispettano la loro ordinata struttura tridimensionale: nel caso specifico, il sistema di atomi di itterbio, sollecitato con un periodo T, risponde con un periodo più grande di T.

Come descritto sulle «Physical Review Letters», il gruppo di Berkeley ha realizzato un modello monodimensionale discreto di cristallo temporale di cui, in particolare, è stato possibile definire in modo univoco la rigidezza misurando le oscillazioni indotte al variare delle sollecitazioni applicate. Secondo Norman Y. Yao, a capo del gruppo di ricerca, «durante l'ultimo mezzo secolo abbiamo esplorato lo stato di equilibrio della materia, ma ora sta iniziando l'era dei materiali in non equilibrio».

Marina Semiglia

La radiazione luminosa spinge e tira

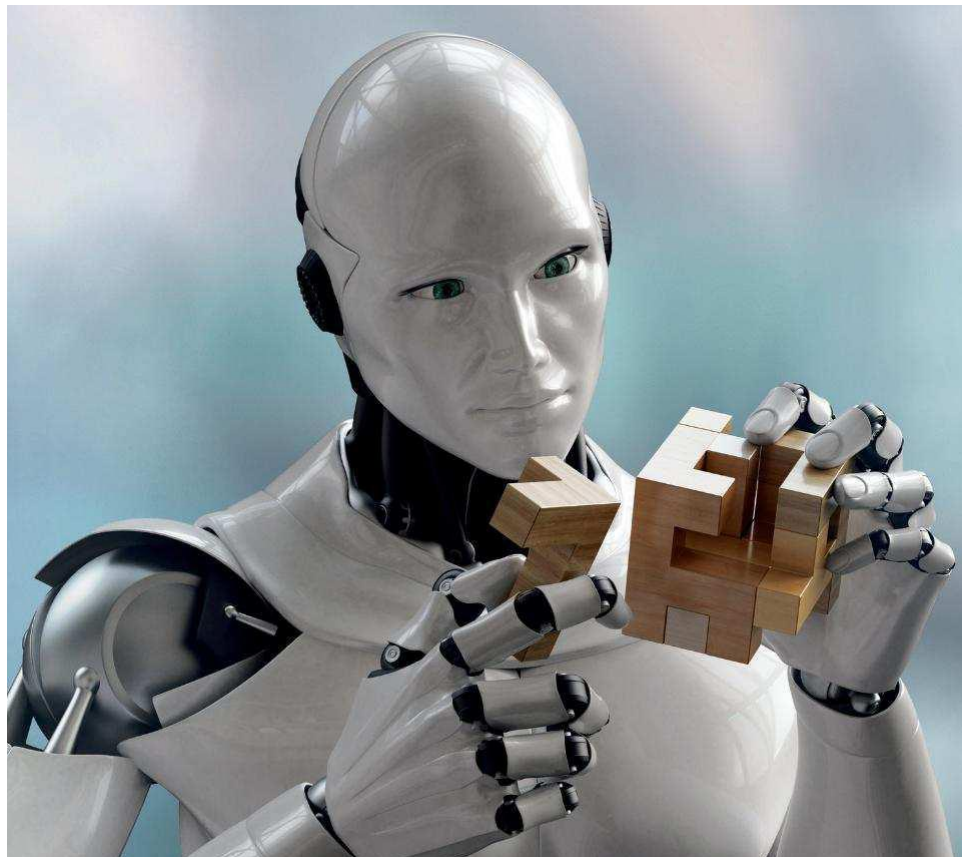
L'interazione tra luce e materia crea forze che possono spostare oggetti, sia spingendoli – tramite forza ottica che trasferisce quantità di moto – sia in modo indiretto. In questo secondo caso, quando due parti di un oggetto assorbono luce in modo diverso tra loro, una delle due si riscalda più dell'altra; la differenza di agitazione termica nell'aria circostante crea una forza, detta fotoforesi, che tira l'oggetto dalla parte a temperatura minore. Le forze ottica e fotoforetica agiscono su tutti gli oggetti esposti alla luce, ma a seconda delle condizioni ambientali solo una delle due prevale.

Un gruppo dell'Università di Zhejiang ha applicato le due forze in sinergia a una sottile lamina d'oro larga circa cinque centesimi di millimetro posta lungo una fibra ottica appuntita. Lo studio, pubblicato sulle «Physical Review Letters», mostra che la luce dispersa sulla punta della fibra riscalda una metà della lamina più dell'altra, creando una forza fotoforetica di trazione. Lontano dalla punta invece la lamina si scalda e prevale la spinta della forza ottica. Sotto l'azione alternata delle due forze, la lamina ha oscillato in direzioni opposte alcune volte prima di arrestarsi; ottimizzando il sistema, la lamina potrebbe muoversi indefinitamente, ponendo le basi per dispositivi di microtrasporto.

Silvia Kuna Ballero

COMPUTER SCIENCE

L’intelligenza artificiale diventa fluida

Sviluppato un modello di IA che risolve problemi in situazioni nuove e mai sperimentate prima

L’intelligenza «fluida», in psicologia, è la capacità di risolvere problemi in situazioni nuove, non sperimentate prima e quindi è indipendente dalle conoscenze acquisite. È considerata una prerogativa intrinsecamente umana, anche se non è esclusiva della nostra specie. Ma ora è anche propria delle macchine. Almeno secondo quanto è emerso da uno studio effettuato alla statunitense Northwestern University, dove un gruppo di ricerca ha sviluppato un modello di intelligenza artificiale in grado di risolvere i test sviluppati dagli psicologi proprio per misurare l’intelligenza fluida.

Si tratta di prove che tutti quanti noi, almeno una volta, abbiamo fatto nel corso di test psicoattitudinali. Per esempio, vengono mostrate immagini, come una freccia con la punta in alto, una con la punta a sinistra e una con la punta a destra, e l’esaminato deve dire quale figura manca (chiaramente la freccia con la punta verso il basso). Test di questo tipo sono detti matrici progressive di Raven, e possono essere ovviamente ben più complessi dell’esempio illustrato.

Ebbene, il sistema della Northwestern University, sviluppato su una piattaforma di intelligenza artificiale chiamata CogSketch, è in grado di risolvere matrici di Raven con la stessa precisione di almeno il 75 per cento degli statunitensi, ovvero al di sopra della media, come illustrato sulla rivista «Psychological Review». CogSketch è stato messo a punto da Kenneth Forbus, docente di *computer science* che dirige l’area per i sistemi cognitivi dell’università statunitense, in collaborazione con il suo collega Andrew Lovett. Il sistema è in grado di collegare stimoli visuali, spaziali e concettuali per elaborare un suo «pensiero».

«Quello che emerge dal nostro esperimento con le matrici di Raven – osserva Forbus – è che quanto più queste matrici sono difficili da risolvere per le persone, tanto più lo sono anche per CogSketch. Un risultato che suggerisce che qualcosa nella costruzione e nel funzionamento del sistema rispecchia proprietà importanti della cognizione umana».

Riccardo Oldani

Un carta riscrivibile per il futuro

Viviamo nell’era digitale, eppure continuiamo a usare la carta, consumando cellulosa e producendo rifiuti da smaltire. Gli scienziati sono quindi sempre alla ricerca di soluzioni innovative più sostenibili per l’ambiente, e una delle ultime novità arriva dai laboratori della cinese Shangdong University, dove un gruppo di ingegneri ha sviluppato un materiale a basso costo su cui scrivere e riscrivere sino a 40 volte senza sacrificare la qualità.

Il materiale, spiega lo studio, pubblicato su «Applied Materials & Interfaces», non è fatto di cellulosa ma di una sottile membrana di ossido di tungsteno, un composto chimico a bassa tossicità, e polivinilpirrolidone, un polimero solubile in acqua usato nell’industria farmaceutica e in quella alimentare. Il processo di stampa avviene esponendo il materiale alla luce ultravioletta per almeno 30 secondi: la luce cambia il colore della membrana da bianco a blu, e basta applicare uno *stencil* (una maschera normografica) per stampare lettere, forme o disegni. E per cancellare? In realtà, l’azione dell’ossigeno o dell’ozono atmosferici fa sbiadire naturalmente il colore nel giro di 1-2 giorni, ma il processo si può velocizzare (30 minuti) utilizzando il calore o ritardare (fino a dieci giorni) trattando la membrana con piccole dosi di un polimero sintetico.

Martina Saporiti

mennovandijk/iStockphoto (*cyborg*);
a fronte: Ian Han e altri (S. coronarius); tcly/iStockphoto (*chirurgo*)

EVOLUZIONE

L'alba dei deuterostomi

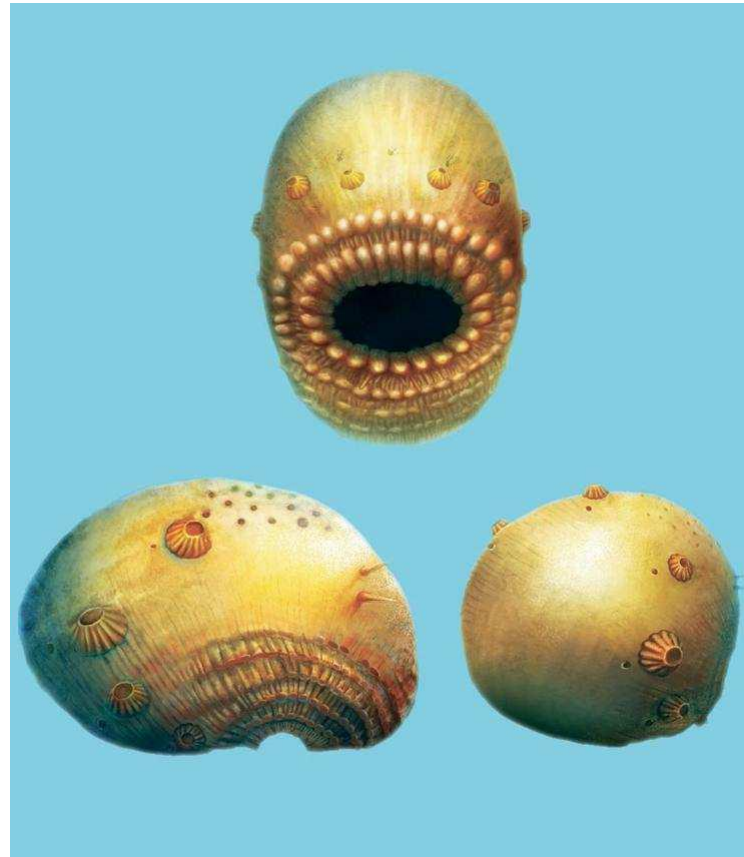
Scoperto il più antico antenato comune del gruppo di cui fanno parte anche i vertebrati

Il corpo ellittico coperto da piccole escrescenze e una bocca sproporzionata che fungeva anche da ano. Era questo l'aspetto di *Saccorhytus coronarius*, l'organismo deuterostoma più antico mai scoperto, descritto da un gruppo di paleontologi cinesi su «Nature».

I deuterostomi sono un grande gruppo di animali accomunati a livello embrionale dalla formazione secondaria della bocca, che comprende, tra gli altri, echinodermi e vertebrati. Secondo le prove fossili, *S. coronarius* era una creatura millimetrica che abitava il fondo marino sabbioso risucchiando piccoli frammenti di cibo oppure altri microrganismi. Ricoperto da una pelle flessibile e sottile, era probabilmente dotato di muscoli che gli permettevano di spostarsi tramite contrazioni.

I calcari in cui è stato trovato risalgono a circa 540 milioni di anni fa, un periodo immediatamente precedente alla grande radiazione evolutiva che portò alla differenziazione dei deuterostomi. Secondo i ricercatori, *S. coronarius* sarebbe il più antico antenato comune del gruppo e quindi anche dell'essere umano. Proprio la diversità delle forme successive ha complicato la sua classificazione. «Inizialmente non capivamo se si trattasse di un antico echinoderma oppure di qualcosa di più primitivo», spiega Jian Han, primo autore dell'articolo.

Tra le caratteristiche insolite vi erano numerose escrescenze coniche che sporgevano dal corpo. È possibile che queste strutture fossero un precursore evolutivo delle moderne branchie e permettessero all'organismo di espellere l'acqua inghiottita, mentre gli scarti del metabolismo uscivano dalla bocca. I risultati confermano inoltre che l'incongruenza di datazione tra record geologico e dati biomolecolari per i fossili risalenti a periodi geologici remoti sia da attribuire alle dimensioni microscopiche della maggioranza delle forme di vita e quindi al loro difficile ritrovamento.

Davide Michielin

La prima chimera umano-animale, tra limiti e potenzialità

L'ambizione non è nuova: far crescere organi umani in ospiti animali per affrontare la costante carenza di organi destinati ai trapianti. La strada per raggiungere l'obiettivo sarebbe la creazione di chimere, cioè organismi ibridi formati dalle cellule di specie diverse, in modo che i medici dispongano di un fegato o un pancreas formati da cellule umane, ma cresciuti nel corpo di una vacca o di un maiale. Uno scenario che è sembrato per decenni irrealizzabile sia per i comprensibili problemi etici sia per le difficoltà tecniche legate alla procedura.

Ora un gruppo di biologi del Salk Institute degli Stati Uniti ha mosso un primo passo proprio sul percorso della procedura. I ricercatori hanno creato la prima chimera umano-animale, inserendo cellule staminali umane negli ovuli fecondati di maiali. Sviluppandosi, alcuni embrioni hanno incorporato le cellule umane, diventando di fatto organismi ibridi. I risultati dello studio, pubblicati su «Cell», invitano però alla cautela: il contributo umano agli embrioni ibridi è stato limitato, con poche cellule della nostra specie osservate negli organismi. Inoltre, molti degli embrioni che hanno incorporato le cellule umane hanno mostrato uno sviluppo rallentato.

La ricerca si basa su precedenti studi effettuati su ratti e topi: in quelle specie, la creazione di chimere incontra meno problemi, e il livello di incorporazione di cellule è decisamente più alto. Perché questa differenza nei risultati? Le difficoltà nel creare un ibrido umano-maiale si può in parte spiegare con la distanza evolutiva tra le due specie, che è più grande rispetto a quella tra topi e ratti. Anche i diversi tempi di sviluppo non giocano a favore: nei maiali l'embrione si sviluppa più velocemente rispetto alla nostra specie, e diventa fondamentale studiare il momento giusto per impiantare le cellule. Nonostante il parziale successo, quindi, l'idea di poter «coltivare» organi umani in altre specie rimane ancora lontana.

Valentina Daelli

AMBIENTE

L'Antartide è veramente così solido?

Le acque più calde che si insinuano sotto la calotta ne destabilizzano l'intera struttura

L'innalzamento del livello del mare è dovuto in parte alla dilatazione termica dell'acqua di mari e oceani che si stanno scaldando e in parte alla fusione dei ghiacci che si trovano sui continenti. Tra questi ultimi, l'Antartide è un sorvegliato speciale. Mentre la sua penisola occidentale appare piuttosto fragile, si è sempre pensato che il grosso del continente antartico fosse molto solido, a causa della massa e dello spessore enormi del suo ghiaccio.

Ora, nuovi studi osservativi minano questa visione forse eccessivamente ottimistica. In particolare, Stephen Rintoul, dell'Università della Tasmania in Australia, e colleghi hanno studiato accuratamente il ghiacciaio Totten nell'Antartide orientale con apposite campagne e impiego di dati satellitari. Il loro studio è stato recentemente pubblicato su «Science Advances».

I ghiacciai antartici, e quindi anche il Totten, scendono fino al mare, dove si trova una calotta collegata ai ghiacciai stessi ma a contatto con le acque dell'Oceano Antartico, su cui si estende per migliaia di chilometri quadrati. È questa calotta che funge da tappo al ghiaccio sul continente, impedendogli, in caso di sua instabilità, di cadere in mare. È dunque cruciale studiarne l'evoluzione.

Ebbene, la ricerca di Rintoul e collaboratori mostra che i fenomeni che vi accadono non sono solo di fusione dei ghiacci a causa di un contatto «statico» con aria e acque dell'oceano che mostrano ora una temperatura aumentata. Infatti queste acque si insinuano sotto la calotta e in parte dentro il ghiacciaio, formando cavità in cui acqua relativamente calda destabilizza l'intera struttura della calotta. E se la calotta dovesse cedere, si rischia la caduta in mare di buona parte del ghiacciaio, con enormi e brusche conseguenze sul livello del mare.

Questo studio si innesta su un filone di ricerca che sta scoprendo meccanismi di tipo simile anche nell'altro emisfero terrestre, in Groenlandia. Ciò fa temere che le precedenti proiezioni future sull'innalzamento del livello del mare possano essere molto sottostimate.

Antonello Pasini

Nessun aumento per i gas serra

Forse la Terra ha imboccato la giusta strada nella lotta al cambiamento climatico. Lo suggeriscono i risultati, pubblicati su «Nature Climate Change», di un progetto condotto in sinergia da alcuni tra i più importanti enti di ricerca del settore.
Gli scienziati hanno sviluppato indicatori in grado di monitorare il rispetto degli impegni presi dai paesi alla conferenza sul clima tenutasi a Parigi a dicembre 2015. Applicando il metodo al recente passato, i ricercatori hanno scoperto che nel 2016, per il terzo anno consecutivo, le emissioni globali di anidride carbonica sono rimaste stabili a 36 miliardi di tonnellate.
«La diffusione di eolico e fotovoltaico, soprattutto in Cina, Europa e Stati Uniti, inizia ad avere effetto a livello globale», sostiene Glen Peters, del Center for International Climate and Environmental Research a Oslo e primo autore dello studio. Il contributo delle rinnovabili al momento non è però sufficiente. Il rallentamento è dovuto principalmente a fattori economici, come l'aumento dell'efficienza energetica nei processi industriali e il sorpasso a livello mondiale del gas naturale sul carbone nella produzione di elettricità. Per questo gli autori ribadiscono il ruolo cruciale delle tecnologie di cattura e stoccaggio del carbonio nella lotta al cambiamento climatico.

Davide Michielin

NEUROSCIENZE

Come l'LSD apre le porte della percezione

La ricerca ha fatto luce anche sui meccanismi cerebrali coinvolti nella formazione dei giudizi

L'LSD (dietilammide dell'acido lisergico) è una delle più potenti sostanze psichedeliche note, ma per decenni il suo studio è stato considerato tabù, quando non addirittura vietato. Oggi, però, questa molecola sta riguadagnando l'attenzione della farmacologia per i suoi effetti anche molto positivi osservati nella cura della depressione e di diversi disordini psichiatrici.

Ne è un esempio un recente studio effettuato dall'Università di Zurigo e pubblicato su «Current Biology», che ha spiegato alcuni importanti meccanismi con cui il cervello attribuisce il significato e il giudizio alle cose.

Con l'impiego combinato dell'*imaging* funzionale e di specifici test comportamentali, gli scienziati hanno indagato su che cosa succede ai neuroni quando si ascolta un brano musicale, mediato o non mediato dalla somministrazone di LSD. In questo modo hanno scoperto che giudizio personale e sensazioni provate dai pazienti cambiano significato e, in particolare, sono percepite tanto più intensamente quanto più la molecola è legata ai recettori di tipo 5-HT2AR della serotonina e della dopamina.

Questi neurotrasmettitori svolgono ruoli fondamentali nella regolazione dell'umore, del sonno e degli stimoli che inducono motivazione e ricompensa, e quando l'LSD, agonista di queste sostanze, va a sostituirsi a esse nei legami recettoriali, si riscontra l'anomala e amplificata percezione della realtà caratteristica della sua assunzione. Dallo studio, infatti, è emerso che la ketanserina, che agisce invece come antagonista sui recettori 5-HT2AR, ne blocca gli effetti.

La ricerca non solo ha chiarito per la prima volta i meccanismi chimici alla base dell'azione del dietilammide dell'acido lisergico sui neuroni, ma ha anche fatto luce, grazie alla risonanza magnetica funzionale, sulle aree cerebrali coinvolte durante la formazione dei giudizi, cioè le strutture mediane della corteccia.

Marina Semiglia

3000RISK/iStockphoto (*concerto*); a fronte: Photoshot / AGF (*ghiacciaio*);

Cronologia di una catastrofe

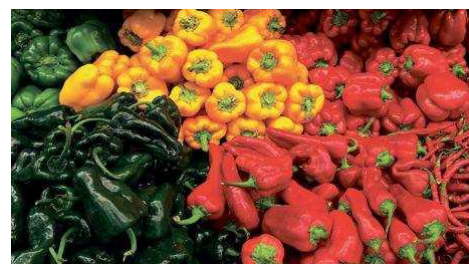
Il cratere Chicxulub è il segno più evidente lasciato dall'impatto dell'asteroide che 65 milioni di anni fa colpì l'attuale Yucatan, in Messico, contribuendo alla scomparsa dei dinosauri. In questa depressione di circa 180 chilometri di diametro, geofisici dell'Imperial College di Londra hanno effettuato carotaggi fino a un chilometro di profondità per ricostruire i cambiamenti che hanno modificato la conformazione della crosta terrestre in seguito all'impatto. Dall'analisi della stratificazione del suolo è stata ricostruita una cronologia del cataclisma.
Il corpo celeste attraversò gran parte della crosta terrestre scaraventando rocce fino a 25 chilometri di altezza; contemporaneamente si generarono terremoti fino al decimo grado della scala Richter e una formazione rocciosa più alta della catena himalayana si sollevò per poi collassare. «L'onda d'urto deve aver rotto i legami e le forze che tenevano unite le rocce, facendo perdere loro compattezza e permettendo così alla massa di comportarsi temporaneamente come un fluido», racconta Sean Gulick, capo della spedizione. Secondo lo studio pubblicato su «Science», inoltre, le rocce che subirono una deformazione da impatto potrebbero aver dato origine a un habitat ideale per nuove forme di vita. (MaMa)

Stabilizzare gli edifici con un biocemento

Batteri che producono una sorta di cemento in risposta alla pressione potrebbero stabilizzare le fondamenta degli edifici, compensando in automatico ogni cedimento o spostamento. È il cosiddetto «suolo pensante», un'idea presentata da Martyn Dade-Robertson, dell'Università di Newcastle, nel Regno Unito, all'ultima conferenza annuale della Association for Computer Aided Design in Architecture statunitense.

A Newcastle alcuni studenti avevano prodotto un batterio che ripara le crepe degli edifici secernendo un biocemento, a base di carbonato di calcio e sostanze organiche. Dade-Robertson ha pensato di sfruttare lo stesso principio per creare un ceppo di *Escherichia coli* che produca il biocemento in risposta alla pressione. Ha quindi individuato un centinaio di geni la cui attività si moltiplica almeno tre volte se il batterio è schiacciato a dieci atmosfere. E ha verificato che, in effetti, una proteina controllata dalle sequenze regolatorie di uno di questi geni è espressa tanto più quanto più cresce la pressione.

Ha inoltre creato un modello al computer che simula come questi batteri reagiranno a diverse variazioni di pressione. Per completare l'opera, bisognerà mettere la produzione del biocemento sotto il controllo di questo DNA regolatorio e verificare i risultati sul campo. (GiSa)

L'antenato del peperone

Cinquantadue milioni di anni: è questa l'età dei due frutti fossili scoperti qualche tempo fa in Patagonia e ora oggetto di una ricerca pubblicata su «Science». Secondo Peter Wilf, della Pennsylvania State University, e colleghi, l'età dimostra che la loro famiglia, che include ortaggi oggi molto comuni, è molto più vecchia di quel che abbiamo pensato finora. I due esemplari fossili appartengono al genere *Physalis*, della famiglia delle solanacee (pomodori, melanzane, patate e peperoni), e somigliano molto agli alchechengi, con il tipico e fragile involucro simile a una lanterna di carta che avvolge il frutto.

Si credeva che questa famiglia si fosse evoluta contemporaneamente alla formazione delle Ande, circa 25 milioni di anni fa, ma i nuovi reperti dimostrano che l'origine è ben più antica. È noto infatti che in termini di storia evolutiva le *Physalis* sono un ramo recente delle solanacee, che nel loro complesso sarebbero dunque ben più antiche dei due fossili. (FeSg)

Il colore quantistico dell'oro

Determinare per via teorica le caratteristiche dei vari livelli elettronici degli atomi pesanti è un'operazione complessa, perché occorre considerare gli effetti relativistici dovuti non solo al forte potenziale elettrico del nucleo, ma anche all'interazione fra gli elettroni nei diversi orbitali. Uno degli atomi più complessi da studiare è l'oro, che ha 79 elettroni, di cui fino a oggi si avevano forti discrepanze fra i valori teorici e quelli sperimentali dell'energia di ionizzazione, l'energia necessaria a strappare un elettrone dall'atomo, e dell'affinità elettronica, l'energia necessaria ad aggiungerne uno.
Con un nuovo approccio, che tiene conto non più di terne di elettroni, ma estende i calcoli all'interazione fra cinque elettroni, Peter Schwerdtfeger, della Massey University di Auckland, in Nuova Zelanda, ha aumentato di un fattore dieci la precisione dei calcoli teorici sull'oro, riducendo la discrepanza fra i valori teorici e sperimentali di queste energie a pochi millielettronvolt (su valori dell'ordine di qualche elettronvolt). La forte interazione fra gli elettroni spiega anche il caratteristico colore dell'oro: gli effetti relativistici riducono il salto energetico fra gli orbitali indicati come 6*s* e 5*d*, portando l'oro ad assorbire le frequenze blu e a riflettere quelle gialle. (EmRi)

Science Photo Library/AGF (*cratere Chicxulub*); CampPhoto/iStockphoto (*peperoni*); Chantal de Bruijne/Shutterstock (*oro*)

Se lo squalo fa da sé

L'hanno allontanata dal compagno, nel tentativo di placare il suo ritmo riproduttivo, ma Leonie, un esemplare femmina di squalo zebra (*Stegostoma fasciatum*) del Queensland Aquarium, in Australia, non ha voluto piegarsi agli eventi, e dopo ben tre anni ha sfornato tre nuovi pesciolini vispi e sani.

In un primo momento gli addetti all'acquario hanno pensato che il pesce avesse conservato un po' dello sperma del maschio, ma l'analisi genetica dei tre squaletti, anzi squalette, pubblicata su «Scientific Reports» non ha lasciato dubbi: le piccole avevano solo il DNA della madre. Benché sia già noto che in alcuni, rari casi gli squali possano riprodursi per via asessuata, non si era mai visto un esemplare passare a questo tipo di riproduzione dopo che si era già riprodotto per via sessuata. In natura si tratta solo del terzo caso documentato di questo tipo di passaggio, gli altri due erano un boa constrictor e una manta. (FeSg)

I limiti della genomica nella stima delle specie

Nell'ultimo decennio la combinazione di tecniche genomiche e modelli matematici ha rivoluzionato la sistematica degli esseri viventi, permettendo di determinare i confini tra specie senza bisogno di alcun tipo di conoscenza tassonomica. Uno strumento potente che fornisce grandi quantità di informazioni genetiche dettagliate, le cui differenze sono impossibili da validare ricorrendo al confronto tra esemplari.

Uno studio pubblicato sui «Proceedings of the National Academy of Sciences» da Lacey Knowles e Jeet Sukumaran, dell'Università del Michigan, mostra limiti nell'accuratezza dell'approccio usato per piante e animali. I ricercatori hanno applicato un modello basato sull'ereditarietà degli alleli a un *database* di dati genetici simulati per confrontare due scenari evolutivi: un lungo processo di speciazione e un evento istantaneo. Quando il modello non riconosce la natura prolungata del processo, sovrastima in media tra le 5 e le 13 volte il numero di specie.

Secondo gli autori, è dovuto all'errata valutazione della varietà genetica intraspecifica: popolazioni isolate appartenenti alla stessa specie sono etichettate come specie distinte. «La disponibilità di dati genomici aumenta esponenzialmente mentre le nostre certezze sui confini delle specie diminuiscono», riassume Knowles. (DaMi)

L'habitat si espande con l'adattamento

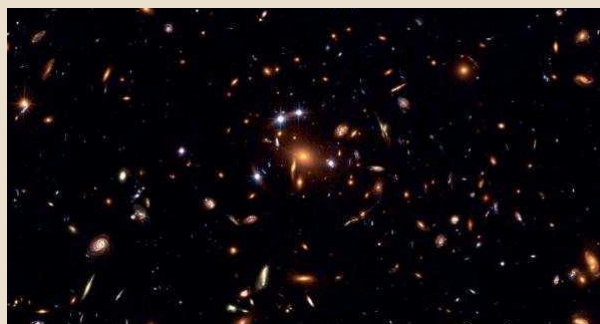
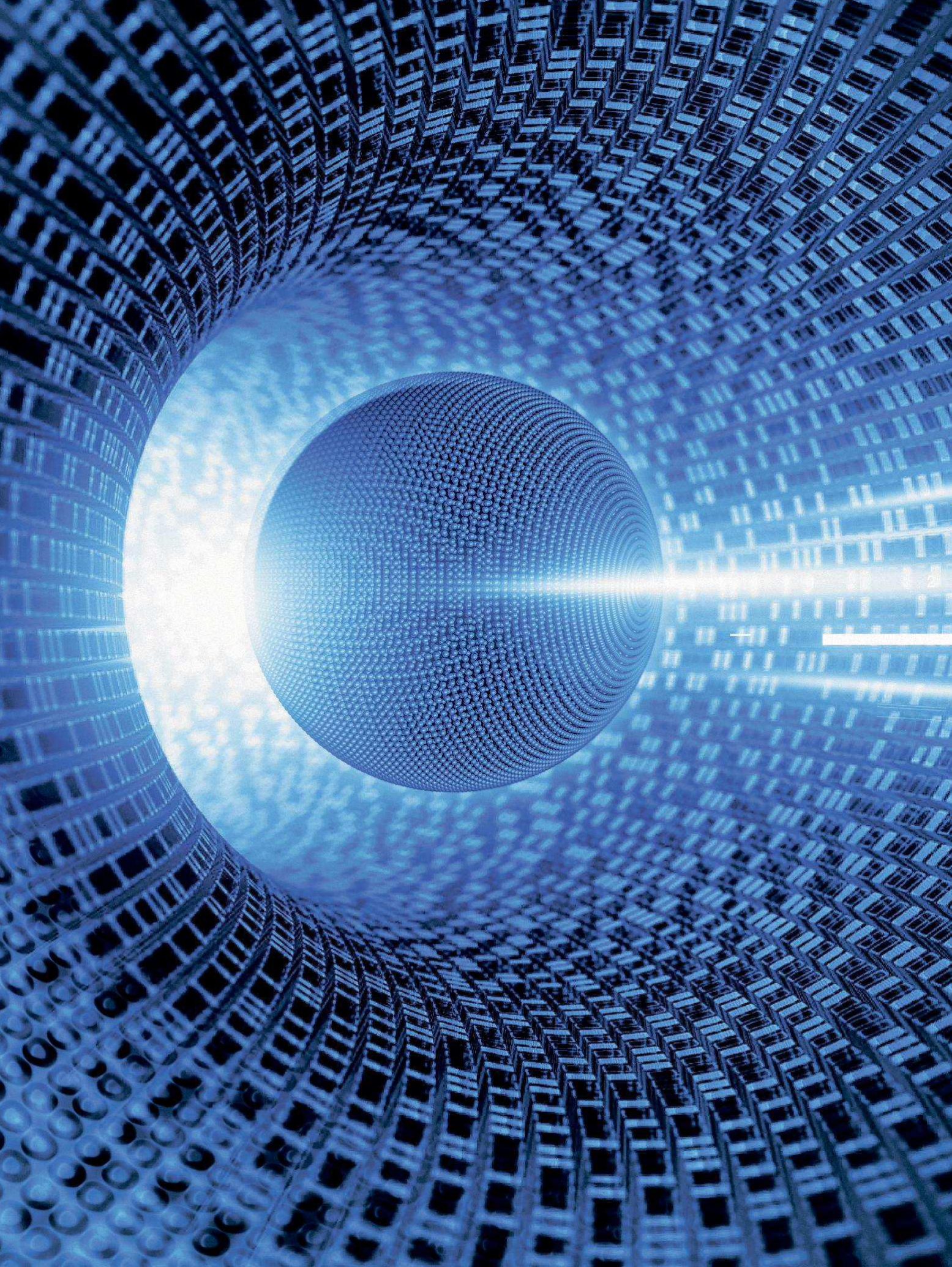
Quanto più rapidamente una determinata specie è riuscita ad adattarsi a un nuovo habitat, tanto più questo si è espanso su larga scala, con conseguenze a lungo termine sugli ecosistemi molto più pesanti di quelle ipotizzate. Lo ha scoperto un gruppo diretto da Christopher Weiss-Lehman, dell'Università del Colorado a Boulder, con esperimenti sui coleotteri *Tribolium castaneum*. Gruppi di insetti geneticamente omogenei sono stati posti in ambienti artificiali con condizioni differenti per studiarne il tasso di crescita

e di adattamento; questo ha permesso di mettere a punto modelli statistici da cui è emerso che la velocità di adattamento in aree ai margini del normale habitat è un fattore determinante sull'espansione dell'areale.

Questa colonizzazione su larga scala di nuove aree da parte di una specie è un indicatore fondamentale dei cambiamenti in atto nell'ambiente e, come si può leggere su «Nature Communications», l'importanza dei processi evolutivi nello studio dell'espansione dell'areale è stata finora sottostimata: poiché il riscaldamento globale favorisce l'invasione di specie aliene spesso dannose e a scapito della biodiversità, ora come non mai l'argomento merita ulteriori approfondimenti. (MaSe)

Due valori per la costante di Hubble

La costante di Hubble misura il tasso di espansione dell'universo. È quindi uno dei parametri cosmologici fondamentali per conoscerne età ed evoluzione futura, legata in particolare all'accelerazione dell'espansione, causata, si ipotizza, dall'energia oscura. Sono molte le tecniche con cui determinarne il valore. Una è quella seguita dalla collaborazione internazionale H0LiCOW, guidata da Sherry Suyu, del Max-Planck-Institut für Astrophysik di Monaco di Baviera.

Grazie al telescopio spaziale Hubble e a strumenti a terra, Suyu e collaboratori hanno analizzato la luce proveniente da cinque quasar, nuclei galattici attivi assai luminosi, deformati da lenti gravitazionali (cioè galassie poste lungo la linea di vista fra noi e i quasar), che ne producono immagini multiple. Ora, la luce delle diverse immagini di uno stesso quasar percorre spazi diversi, impiegando tempi diversi per arrivare a noi. Sfruttando la variabilità dell'emissione dei quasar e misurando i ritardi di arrivo, il gruppo ha calcolato la costante di Hubble con una precisione del 4 per cento: 71,9 chilometri al secondo per megaparsec. Più alto e meno preciso di quello ottenuto da Planck, satellite dell'Agenzia spaziale europea, studiando la radiazione cosmica di fondo: 66,93 chilometri al secondo per megaparsec (con un errore inferiore all'1 per cento). (EmRi)

LagunaticPhoto /iStock (*squalo zebra*); brainmaster/iStockphoto (*farfalle*); cortesia NASA/ESA, K. Sharon, Università di Tel Aviv e E. Ofek, Caltech (*quasar da Hubble*)

FISICA TEORICA

Grovigli nello spazio-tempo

Un progetto che coinvolge centinaia di fisici esamina l'ipotesi per cui spazio e tempo siano emersi dall'entanglement quantistico di minuscoli frammenti di informazione

di Clara Moskowitz

Clara Moskowitz è *senior editor* di «Scientific American» e si occupa di spazio e di fisica. È laureata in astronomia e fisica alla Wesleyan University e in giornalismo all'Università della California a Santa Cruz.

“Tutto il mondo è un palcoscenico», scriveva Shakespeare, e anche i fisici tendono a essere d'accordo. Il loro palcoscenico è lo spazio nel suo complesso e, in genere, lo spazio non sembra altro che lo sfondo su cui agiscono forze e campi che vi risiedono: di per sé, secondo il pensiero tradizionale, lo spazio non è fatto di niente. Gli scienziati però hanno cominciato a mettere in dubbio questa convenzione. Lo spazio – o meglio, nel linguaggio della relatività generale, lo spazio-tempo – potrebbe essere composto da minuscoli elementi di informazione. Questi frammenti, secondo la teoria, interagirebbero tra loro per generare lo spazio-tempo e far emergere sue proprietà, fra cui la curvatura che provoca la gravità. Se questa idea è corretta, non si limiterebbe a spiegare lo spazio-tempo, ma contribuirebbe anche a raggiungere l'agognata teoria quantistica della gravità, che fonderebbe relatività generale e meccanica quantistica, le due imponenti teorie della fisica che tendono a non andare d'accordo fra loro.

Di recente centinaia di fisici si sono entusiasmati per questa possibilità, e si incontrano circa ogni tre mesi nell'ambito di un progetto chiamato «It from Qubit».

L'«It», la cosa, in questo caso è lo spazio-tempo, mentre il qubit (da *quantum bit*, bit quantistico) rappresenta la minima quantità possibile di informazione, analoga a un bit informatico ma su scala quantistica. L'idea che anima It from Qubit è che l'universo si sia formato in base a qualche codice e che se riuscissimo a decrittarlo avremmo trovato un modo per capire la natura quantistica degli eventi su larga scala del cosmo. Il più recente incontro di It from Qubit (IfQ) si è tenuto nel luglio 2016 presso il Perimeter Institute for Theoretical Physics, in Ontario. Gli organizzatori si aspettavano circa 90 partecipanti, ma hanno ricevuto così tante richieste di iscrizione che alla fine ne hanno accettate 200 e hanno tenuto cinque sessioni simultanee collegate via satellite in diverse università. «Penso che questa sia una delle più promettenti, se non la più promettente, direzione di ricerca sulla gravità quantistica», dice Netta Engelhardt, ricercatrice alla Princeton University, che non fa parte ufficialmente di IfQ ma ne ha seguito alcuni incontri. «Sta spiccando il volo».

Dato che il progetto riguarda sia l'informatica quantistica sia lo studio dello spazio-tempo e della relatività generale, mette insieme due gruppi di ricercatori che in genere non collaborano: da una parte studiosi di informazione quantistica e dall'altra fisici delle alte energie e teorici delle stringhe. Circa un anno fa la Simons Foundation, un'organizzazione privata che sostiene la ricerca scientifica, ha concesso un finanziamento per la collaborazione It from Qubit e per i fisici intenzionati a studiare e a tenere incontri sull'argomento. Da allora l'entusiasmo è cresciuto, e in incontri successivi si sono aggiunti sempre più ricercatori, alcuni membri ufficiali delle collaborazione finanziata dalla Simons Foundation e molti altri semplicemente interessati all'argomento. «Il progetto affronta questioni molto importanti, ma assai difficili», spiega il collaboratore IfQ Beni Yoshida, ricercatore al Perimeter. «La collaborazione è necessaria, non è un problema che possa risolvere qualcuno da solo».

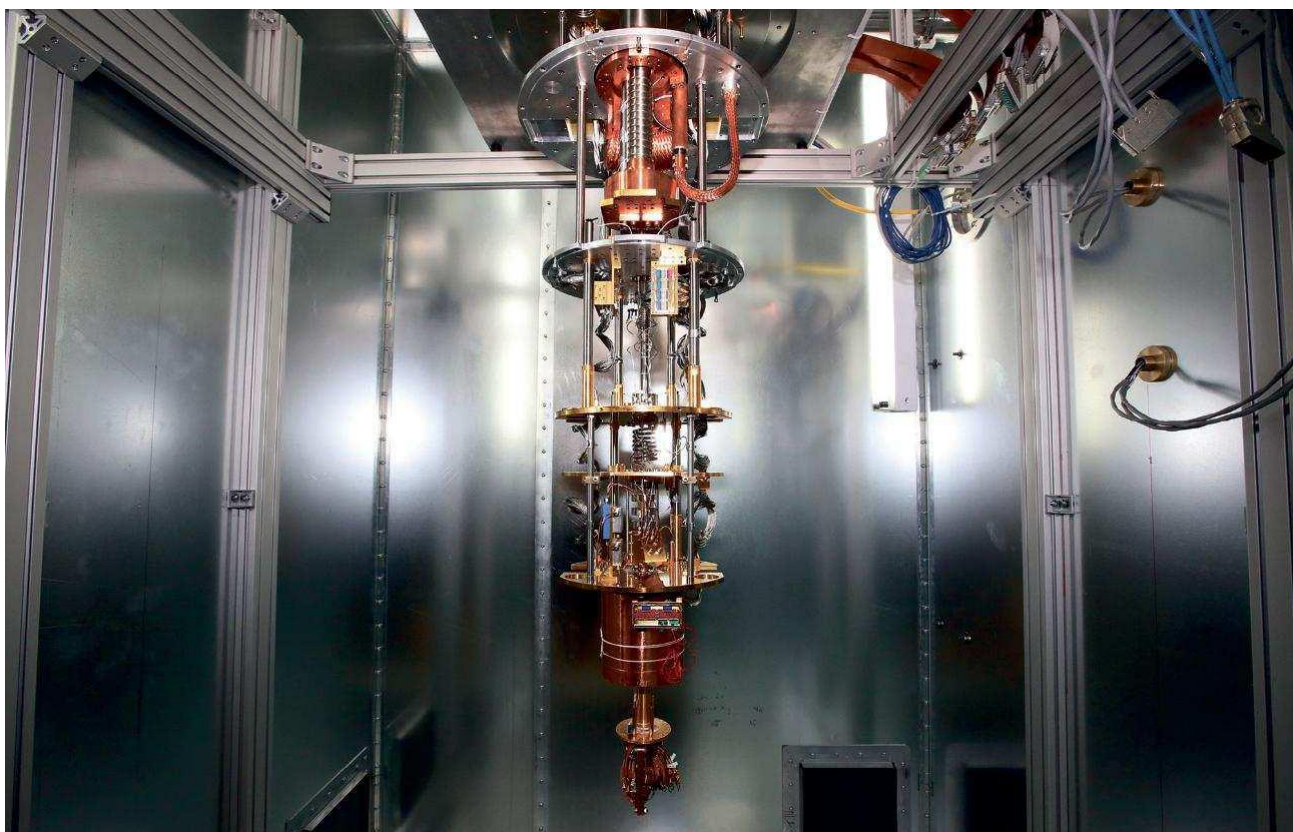
Anche scienziati al di fuori del progetto hanno mostrato estremo interesse. «Se il collegamento con l'informazione quantistica si rivela fondato come è previsto da qualcuno, allora ne potrebbe nascere una nuova rivoluzione nel nostro modo di concepire lo

IN BREVE

È possibile che lo spazio-tempo sia formato da minuscoli elementi fondamentali di informazione? Se così fosse, questi componenti potrebbero essere tenuti insieme dall'entanglement quantistico, in cui due particelle mantengono un collegamento istantaneo anche separate da una grande distanza.

Gli scienziati perseguono questa idea con un programma di ricerca chiamato «It from Qubit», che mette insieme informatici quantistici e fisici che studiano la relatività generale e la teoria delle stringhe.

L'obiettivo è trovare una teoria quantistica della gravità che possa fondere le teorie incompatibili della meccanica quantistica e della relatività generale.

Illustrazione Kenn Brown, Mondolithic Studios (*pagine precedenti*)

I computer quantistici, come questo realizzato da D-Wave Systems, potrebbero aiutare i ricercatori a capire la forza di gravità.

Kim Stallknecht/Redux Pictures

spazio e il tempo», afferma il teorico delle stringhe Brian Greene, della Columbia University, che non è coinvolto in IfQ. «È una questione di grande importanza, ed è davvero appassionante», sottolinea Greene.

Spazio-tempo aggrovigliato

L'idea che lo spazio-tempo abbia componenti oppure sia «fatto» di qualcosa si allontana dall'immagine tradizionale data dalla relatività generale. La nuova idea è che lo spazio-tempo, anziché essere qualcosa di fondamentale, «emergerebbe» dalle interazioni fra i qubit. Ma di che cosa sono fatti questi elementi, e che tipo di informazione contengono? Gli scienziati non lo sanno, ma curiosamente la cosa non sembra turbarli. «Quello che importa sono le relazioni» fra i bit, più che i bit stessi, dice il collaboratore IfQ Brian Swingle, della Stanford University. «È da queste relazioni collettive che proviene la ricchezza del modello; l'aspetto cruciale non sono i costituenti, ma il modo in cui si organizzano».

La chiave di questa organizzazione potrebbe essere lo strano fenomeno noto come *entanglement* quantistico, uno bizzarro tipo di correlazione che può esistere fra due particelle, grazie a cui le azioni eseguite su una delle due possono avere effetto sull'altra anche se le separa una distanza enorme. «Secondo un'affascinante proposta formulata di recente, la struttura dello spazio-tempo è tenuta insieme dall'entanglement quantistico dei sottostanti "atomi" di spazio-tempo, qualunque cosa siano», spiega Vijay Balasubramanian, fisico dell'Università della Pennsylvania e ricercatore IfQ. «Se è vero, è entusiasmante».

Il ragionamento dietro questa idea deriva da scoperte precedenti di numerosi fisici, come l'articolo del 2006 di Shinsei Ryu, dell'Università dell'Illinois a Urbana-Champaign, e Tadashi Takayanagi, dell'Università di Kyoto, che mostrava una connessione fra entanglement e geometria dello spazio-tempo. Nel 2013, a partire da questo lavoro, Juan Maldacena, dell'Institute for Advanced Study, a Princeton, e Leonard Susskind, della Harvard University, hanno trovato che se due buchi neri diventano *entangled* generano un *wormhole*, una scorciatoia nello spazio-tempo prevista dalla relatività generale. Questa scoperta (soprannominata ER = EPR, le abbreviazioni con cui i fisici si riferiscono ai wormhole e all'entanglement in base ai nomi degli scienziati che li hanno teorizzati) e altre collegate fanno pensare, sorprendentemente, che l'entanglement – che non si riteneva provocasse alcun collegamento fisico – possa produrre strutture nello spazio-tempo.

Per capire come lo spazio-tempo possa essere prodotto dall'entanglement, i fisici devono prima capire meglio come funziona quest'ultimo. Il fenomeno è sembrato «inquietante», come lo definì Einstein, fin da quando lo stesso Einstein e i suoi collaboratori lo previdero nel 1935, perché coinvolge un collegamento istantaneo fra particelle a grande distanza che sembra sfidare il limite secondo cui nulla può muoversi a velocità maggiore della luce. Di recente sono stati studiati vari tipi di entanglement: quello convenzionale consiste nel collegare un'unica caratteristica (come lo spin) di svariate particelle dello stesso tipo diffuse nello spazio. Ma «l'entanglement convenzionale non basta», come dice Balasubramanian. «Mi sono reso conto che ci sono altre forme di entanglement che sono importanti per questo progetto di ricostruzione dello spazio-tempo». Si possono per esempio porre in entanglement particelle di un certo tipo in una certa posizione con altre di un tipo diverso ma nella stessa posizione: è un entanglement che

non riguarda lo spazio. Si studiano anche gli aspetti via via più complessi dell'entanglement fra grandi numeri di particelle.

Una volta chiarite le dinamiche dell'entanglement, gli scienziati sperano di capire come ne deriva lo spazio-tempo, allo stesso modo in cui i movimenti microscopici delle molecole nell'aria generano complessi schemi termodinamici e meteorologici. Sono fenomeni emergenti, dice Engelhardt. «Quando guardiamo qualcosa da molto lontano, vediamo un'immagine diversa, che non sappiamo essere derivata dalla dinamica a una scala inferiore. È uno degli aspetti più affascinanti di IfQ, perché ancora non capiamo la dinamica quantistica fondamentale da cui emergerebbe lo spazio-tempo».

Ologrammi cosmici

L'obiettivo principale di questo lavoro è raggiungere una teoria che descriva la gravità da una prospettiva quantistica, ma da un secolo i fisici che se ne occupano incontrano ostacoli; Einstein stesso cercò con tenacia una teoria simile fino alla morte, ma senza successo. I ricercatori di It from Qubit sperano che li possa aiutare un'idea nota come principio olografico.

Questo principio suggerisce che alcune teorie fisiche siano equivalenti a teorie più semplici che funzionano in un universo di dimensione inferiore, allo stesso modo in cui una cartolina bidimensionale con un ologramma di un unicorno contiene le informazioni necessarie per descrivere e mostrare la forma tridimensionale dell'unicorno. Dato che è difficile trovare una teoria funzionante per la gravità quantistica, l'idea è scoprire una teoria equivalente, ma più facile da trattare, in un universo con meno dimensioni del nostro.

Forse quello che chiamiamo gravità e spazio-tempo è solo un altro modo di vedere il prodotto finale dell'entanglement

Una delle incarnazioni più riuscite del principio olografico è la scoperta nota come corrispondenza AdS/CFT (un acronimo per indicare la corrispondenza anti-de Sitter/teoria di campo conforme), secondo cui è possibile descrivere un buco nero descrivendo che cosa accade sulla sua superficie. In altre parole, la fisica dell'interno – il volume tridimensionale – corrisponde alla fisica dell'esterno – la frontiera bidimensionale. Maldacena ha scoperto questa relazione nel 1997, lavorando nell'ambito della teoria delle stringhe, che è un altro tentativo di gravità quantistica. La teoria delle stringhe sostituisce tutte le particelle fisiche fondamentali con minuscole corde vibranti.

AdS/CFT potrebbe permettere ai fisici di scoprire una teoria che sia equivalente alla gravità quantistica, ne raggiunga tutti gli obiettivi, possa descrivere gli stessi fenomeni e con cui sia più facile lavorare... escludendo la gravità. «È molto difficile ottenere descrizioni quantistiche delle teorie che includono la gravità, mentre quelle in cui non c'è sono molto più facili da descrivere», spiega Balasubramanian. Ma ci si potrebbe chiedere: come si fa, escludendo la gravità, a ottenere una teoria della gravità quantistica? Forse quello che chiamiamo gravità e spazio-tempo è solo un altro modo di vedere il prodotto finale dell'entanglement o, in altre parole, l'entanglement potrebbe in qualche modo codificare l'informazione relativa al volume tridimensionale nei bit memorizzati sulla frontiera bidimensionale. «È una direzione di ricerca molto promettente», conclude.

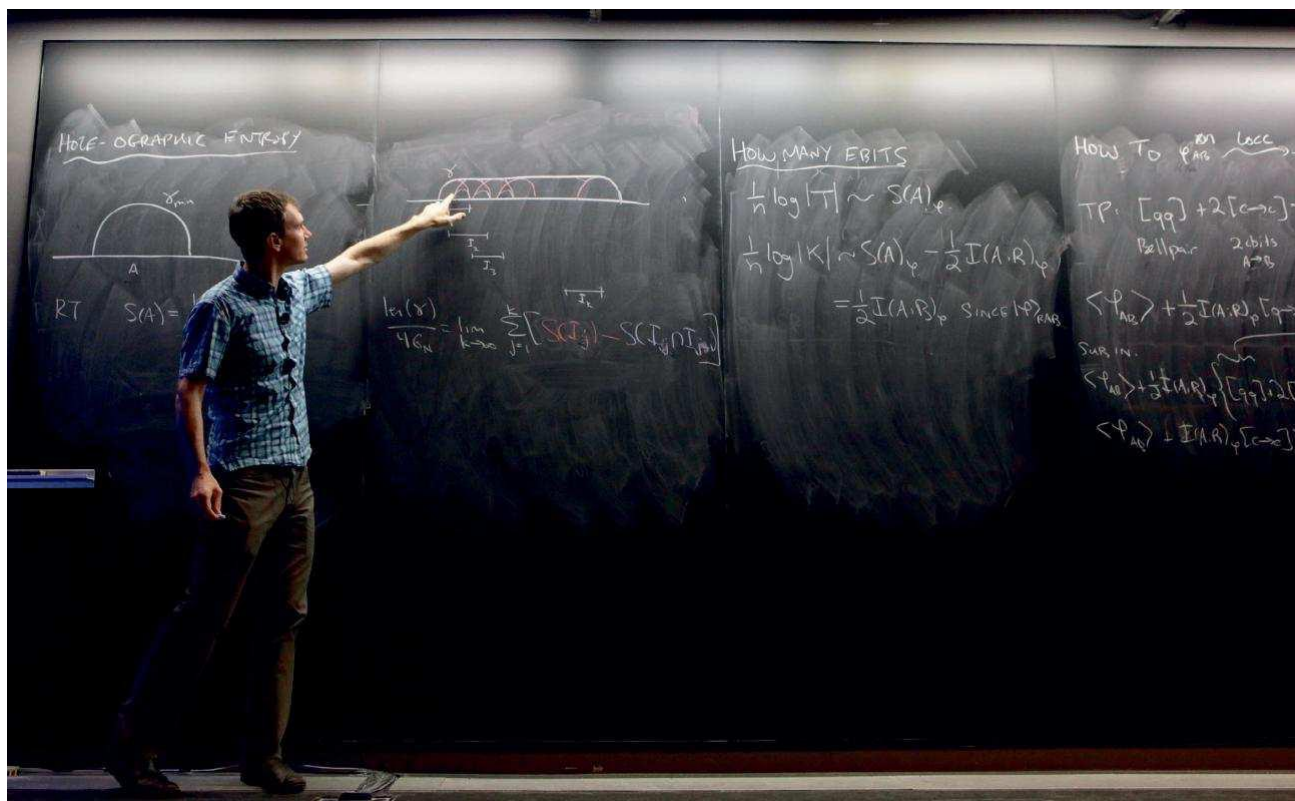
Negli ultimi vent'anni si è visto che la corrispondenza AdS/CFT funziona, dando una teoria bidimensionale che può descrivere una situazione tridimensionale, uno schema detto dualità, ma non si capisce ancora pienamente perché. «Sappiamo che queste teorie sono duali, ma non ne comprendiamo del tutto il motivo», dice Swingle. «Un risultato di It from Qubit in cui possiamo sperare è una teoria su come emergano queste dualità: penso proprio che ci si possa riuscire, e che ci si riuscirà grazie a questa collaborazione, o per lo meno che faremo grossi passi avanti in questa direzione».

La teoria dell'informazione quantistica può essere d'aiuto grazie al fatto che un concetto di questa disciplina noto come «codici di correzione degli errori quantistici» potrebbe essere presente anche nella corrispondenza AdS/CFT. Gli esperti di informatica quantistica hanno messo a punto questi codici per evitare di perdere informazioni quando qualcosa interferisce con l'entanglement fra i bit. Anziché codificare le informazioni in singoli bit, i computer quantistici usano stati di bit multipli altamente entangled. In questo modo un singolo errore non può danneggiare la precisione di un'informazione. La cosa strana, però, è che l'apparato matematico dei codici appare anche nella corrispondenza AdS/CFT; sembra che l'organizzazione dell'entanglement di bit multipli che si usa per le reti a prova di errore possa anche essere quella che usa l'entanglement per codificare l'informazione dell'interno dei buchi neri sulla loro superficie. «È curioso che si possano trovare codici di correzione di errori nei buchi neri», dice l'informatica quantistica Dorit Aharonov, ricercatrice IfQ alla Hebrew University di Gerusalemme. «Perché mai dovrebbe succedere? Questi collegamenti sono affascinanti».

Se anche i fisici riusciranno a capire come funziona la corrispondenza AdS/CFT e quindi a sviluppare una teoria in bassa dimensione che funziona come gravità quantistica, non saranno ancora arrivati a destinazione. La corrispondenza stessa funziona solo in un «modellino» dell'universo un po' semplificato rispetto al cosmo in cui viviamo. In particolare, tutte le regole della gravità valide nel nostro universo reale non sono in vigore nel mondo semplificato della corrispondenza. «AdS/CFT ha una specie di gravità, ma non è la teoria della gravità di un universo in espansione come il nostro», spiega Swingle. «Descrive un universo come se fosse in una bottiglia: se accendiamo un fascio luminoso, si riflette contro le pareti dello spazio, il che non succede nel nostro universo che si espande». Questo modello fornisce ai fisici un utile ambiente teorico in cui mettere alla prova le loro idee e in cui la situazione semplificata rende più facile affrontare la gravità quantistica. «Speriamo che sia una tappa utile sulla via per capire la gravità del nostro universo», dice Swingle.

Se IfQ è fondato su basi non realistiche, dicono alcuni scettici, a quali risultati potrà portare? «È una critica valida», risponde Engelhardt. «Perché ci concentriamo su questo modellino? Tutto dipende dalla validità del modello e dall'idea che alla fine rappresenti bene il nostro universo. Vorrei essere sicura che se capiamo il modellino, poi capiremo la vita vera». I ricercatori IfQ contano sul fatto che partendo da un'immagine semplificata con cui è più facile lavorare possano poi aggiungere la complessità necessaria per applicare la teoria al mondo reale.

Il risultato finale

Nonostante i loro dubbi, sia gli scienziati del progetto sia quelli esterni a IfQ lo considerano un approccio che vale la pena di esplorare, e che ha già rivelato nuove strade da percorrere. «Da

Patrick Hayden, fisico a Stanford, parla nel corso dell'incontro di It from Qubit di luglio 2016 al Perimeter Institute for Theoretical Physics.

Cortesia Jongbum Park, Perimeter Institute for Theoretical Physics

tempo ho l'impressione che il rapporto fra informazione quantistica e gravità quantistica sia di importanza fondamentale», dice Raphael Bousso, fisico dell'Università della California a Berkeley, che non è membro di IfQ ma ha lavorato con alcuni dei suoi collaboratori. «Il collegamento si è approfondito nel corso degli anni, e sono entusiasta del fatto che tanti scienziati di talento siano al lavoro insieme per affrontare queste domande e vedere dove ci portano». Eva Silverstein, fisica teorica alla Stanford University che non fa parte della collaborazione, concorda: «Sicuramente è il caso di sviluppare e applicare l'informazione quantistica a questi problemi. Ma per capire la dinamica della gravità quantistica serve molto altro, ed è importante che in questo campo non ci si concentri troppo su un solo approccio».

Inoltre, se anche il progetto non raggiungerà una teoria della gravità quantistica, è comunque probabile che dia risultati utili. Mettere insieme tecniche e idee della teoria delle stringhe e della relatività generale per affrontare questioni di informazione quantistica può aiutare, per esempio, a definire meglio i diversi tipi di entanglement, sia per capire lo spazio-tempo che per costruire computer quantistici. «Quando si comincia a giocare con questi strumenti in un ambiente nuovo, è molto probabile che portino a idee interessanti, che si riveleranno utili in altri ambiti», commenta Aharonov. «A quanto pare si stanno facendo progressi su questioni che sono aperte da molti anni». Si è scoperto, per esempio, che è possibile misurare il tempo all'interno dei wormhole considerando il wormhole stesso come un circuito quantistico.

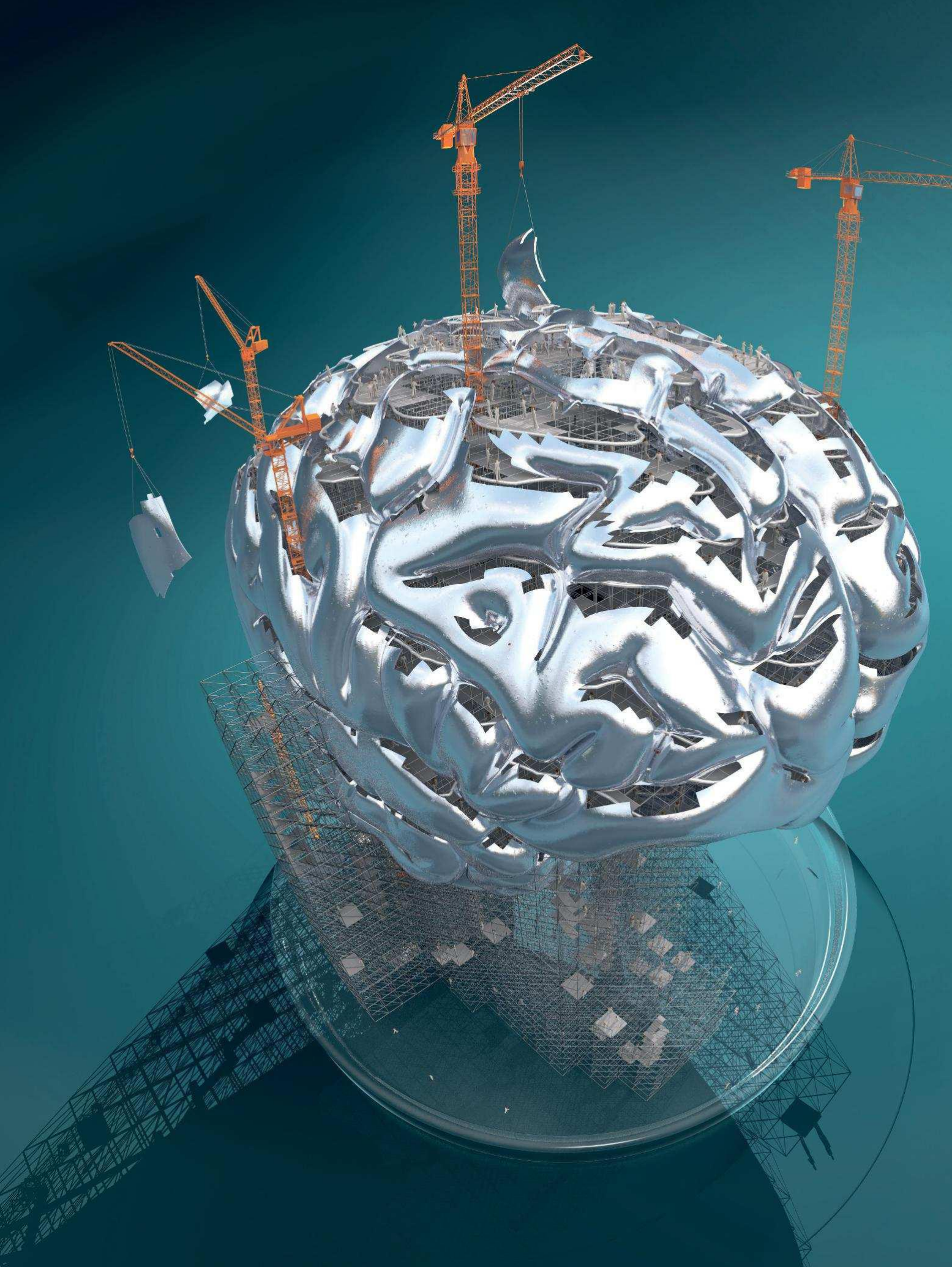
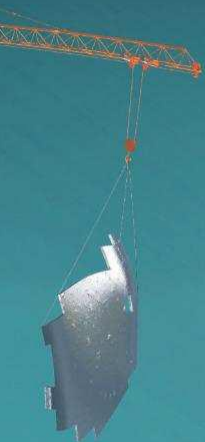
Inoltre unire l'informatica quantistica alla teoria delle stringhe può essere d'aiuto non solo per trovare una teoria della gravità quantistica ma anche per dare una valutazione di eventuali altre teorie trovate. Qualsiasi teoria fisica può essere considerata come un computer, in cui l'input e l'output corrispondono allo stato iniziale della teoria e a un successivo stato misurabile, e alcuni computer sono più potenti di altri. Una volta trovata una teoria della gravità, ci si potrà chiedere quale sia la sua potenza di calcolo. «Se questa potenza risulta eccessiva, se il nostro modello di gravità quantistica fosse in grado di calcolare cose che non crediamo sia possibile calcolare nel nostro mondo, questo metterebbe in dubbio la teoria», dice Aharonov. «È un modo per capire se la teoria è sensata o no da un altro punto di vista».

Ad alcuni fisici questo progetto fa pensare ai giorni inebrianti del passato, in cui prendevano il via altre grandi idee. «Ho cominciato il dottorato nel 1984, quando è arrivata la cosiddetta prima rivoluzione della teoria delle stringhe», ricorda Hirosi Ooguri, fisico del California Institute of Technology. «Era un periodo molto eccitante, quando questa teoria si proponeva come candidata principale al ruolo di teoria unificata di tutte le forze fisiche. L'entusiasmo attuale è simile: in questo campo è un momento stupendo sia per i giovani sia per quelli fra noi che hanno preso il dottorato qualche decina di anni fa». ■

PER APPROFONDIRE

The Large-N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity. Maldacena J., in «International Journal of Theoretical Physics», Vol. 38, n. 4, p. 1113-1133, aprile 1999. Preprint: **https://arxiv.org/abs/hep-th/9711200.**

Sito web del progetto It from Qubit: **www.simonsfoundation.org/mathematics-and-physical-science/it-from-qubit-simons-collaboration-on-quantum-fields-gravity-and-information.**

Entanglement quantistico e geometria. Maldacena J., in «Le Scienze» n. 570, febbraio 2016.

*"Quello che non riesco a creare,
non lo saprò mai capire."*
Richard Feynman, 1988

NEUROSCIENZE

Cervelli in laboratorio

Gli scienziati riproducono l'organo più complesso della natura per risolvere i misteri di alcuni disturbi cerebrali. Dall'autismo all'Alzheimer

di Juergen A. Knoblich

IN BREEVE

La conoscenza sul cervello deriva spesso da esperimenti condotti con topi, ratti o altri animali. I cervelli di queste specie hanno molto in comune con il cervello umano, ma sono privi di una superficie ricca di pieghe, una differenza che influisce sul funzionamento neurale.

Qualità esclusive del cervello umano spiegherebbero perché gli studi con i roditori non hanno prodotto nuovi trattamenti per disturbi cerebrali come schizofrenia o Alzheimer. Questo ha stimolato la ricerca di strade alternative per effettuare esperimenti nelle neuroscienze.

Un'alternativa consiste nello sviluppare in provetta la parte più grande del cervello. Verosimilmente, questi «organoidi», già impiegati nello studio del virus Zika, daranno le informazioni che non si possono ottenere dagli studi con i topi.

Illustrazione di Bryan Christie

Juergen A. Knoblich è direttore scientifico e *senior scientist* dell'Istituto di biotecnologia molecolare dell'Accademia delle scienze austriaca, a Vienna. Studia le cellule staminali neurali e lo sviluppo del sistema nervoso della drosofila o moscerino della frutta.

Tutto ciò che ci rende umani ha sede in quel chilogrammo e mezzo scarso di tessuto giallastro che compone il cervello umano. Qui i nostri pensieri prendono forma, qui proviamo amore oppure odio, e sempre qui hanno origine le idee più creative e le più malvagie del genere umano. Questa struttura, che ricorda per la sua forma una noce, è anche l'organo più complesso che la natura abbia mai generato. Il cervello ospita circa 86 miliardi di neuroni, o cellule nervose, che devono nascere nel momento giusto, migrare nel posto giusto e formare circuiti nel modo giusto, se vogliamo sopravvivere e prosperare.

Capire esattamente come il cervello umano si sviluppa e funziona è la sfida più grande della biologia moderna. Buona parte di quanto sappiamo su quest'organo, da quando più di cent'anni fa sono nate le neuroscienze, deriva da esperimenti sugli animali, il più delle volte topi e ratti. Gli scienziati hanno potuto legittimare questa strategia perché topi ed esseri umani hanno un'architettura cerebrale comune: ospitano molte cellule nervose dello stesso tipo e si affidano sostanzialmente alle stesse parti del cervello per eseguire processi mentali condivisi. Ma gli esseri umani e i roditori differiscono per un aspetto fondamentale: il cervello del topo ha una superficie liscia, mentre quello umano è ripiegato.

Alle persone non esperte di cervello questa differenza potrebbe sembrare trascurabile. Eppure i neurobiologi ritengono che le pieghe rappresentino una differenza enorme per il funzionamento del cervello umano. Permettono infatti a un numero ben maggiore di neuroni di alloggiare nello stesso volume, oltre a essere una caratteristica di spicco di animali «intelligenti» come scimmie, felini, cani e balene. I biologi evoluzionisti hanno dimostrato che questo ripiegamento del cervello ha avuto origine da un'altra differenza fra topi e persone: neuroni in molte parti del cervello hanno origine da un insieme specifico di cellule precursori, che nei topi esistono soltanto in numero esiguo.

Queste differenze potrebbero spiegare perché molte mutazioni genetiche responsabili di gravi disturbi neurologici nell'essere umano hanno scarso effetto quando sono riprodotte nei topi dai ricercatori che studiano i meccanismi di malattie umane. Se le mutazioni influiscono sullo sviluppo o sulla conservazione di un'architettura cerebrale prettamente umana, oppure sul funzionamento di tipi cellulari comuni solo all'essere umano, allora quegli studi sono destinati a fallire. In effetti, le peculiarità del cervello umano potrebbero essere una delle ragioni per cui gli studi con i roditori non hanno prodotto terapie efficaci per disturbi cerebrali come schizofrenia, epilessia e autismo.

Avere riconosciuto le differenze tra il cervello di topo e quello umano ha spronato a ricercare strade più illuminanti per effettuare esperimenti di neuroscienze. Di recente nel mio laboratorio abbiamo concepito una strategia entusiasmante: crescere in miniatura e in piastra di coltura la parte più grande del cervello. Queste strutture cerebrali, chiamate organoidi, offrono ai neuroscienziati un modello del cervello umano che dovrebbe fornire informazioni che non riescono a ricavare dagli studi con i topi. I ricercatori possono osservare che cosa succede quando un cervello in provetta, un mini-cervello, è esposto, per esempio, al virus Zika, che può alterare lo sviluppo cerebrale nei feti di donne infettate, o quando un organoide è modificato geneticamente per imitare un cervello affetto da una malattia neurologica.

Il cervello (o quasi) in provetta

Nel mio laboratorio abbiamo cominciato a lavorare sugli organoidi nel 2012, quando Madeline Lancaster, che allora aveva una borsa di studio nel nostro gruppo, ha concepito un modo per replicare in piastra di coltura i processi essenziali che determinano la formazione del cervello in un feto umano nelle prime dieci settimane circa di sviluppo (*si veda il box nella pagina a fronte*). La nostra procedura si basa su cellule umane, conosciute come cellule staminali, che manifestano una caratteristica notevole, detta pluripotenza. Le cellule staminali pluripotenti sono lo stesso tipo di cellule che ritroviamo nell'embrione precoce. Quando sono coltivate nella giusta condizione, possono dare origine a qualsiasi tipo di tessuto: nervoso, muscolare, sanguigno, osseo, o di altro tipo. Nel feto, queste nuove cellule conservano la pluripotenza solo per pochi giorni. Ma usando speciali colture di laboratorio è possibile conservarle in questo stato in modo permanente, e trasformarle in quasi ogni tipo di cellula desiderata.

Come primo passo coltiviamo le cellule in un liquido contenente le sostanze nutritive necessarie per far crescere il neuroectoderma, la parte del feto che formerà il sistema nervoso. Quando le cellule si aggregano in una sfera, il cosiddetto corpo embrioide, la includiamo in una sostanza di qualità straordinarie chiamata Matrigel. Questo gel, prodotto da cellule in coltura isolate da un tumore cartilagineo di topo, somiglia alla membrana su cui le cellule sono adagiate nel feto. Il Matrigel, ricco di fattori che stimolano le cellule a dividersi e che, insieme, gli impediscono di morire, fornisce un'impalcatura rigida a sufficienza affinché le cellule vi fac-

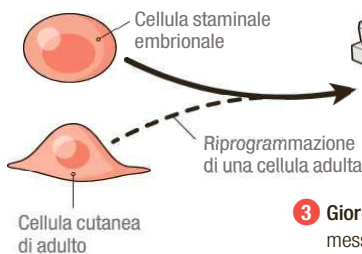
A ciascuno il suo

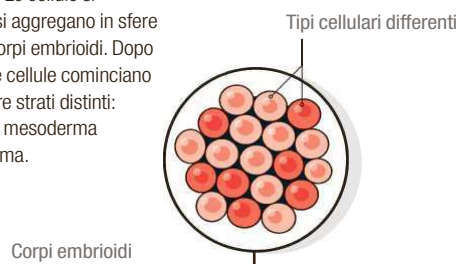
La tecnologia che induce le cellule staminali a svilupparsi in tipi differenti di tessuto biologico è usata per far crescere una parte del cervello che contiene la corteccia e altre strutture, ed è responsabile di funzioni mentali superiori, come l'elaborazione di informazioni dal mondo esterno, la formazione di ricordi e la presa di decisioni. Per creare questo mini-cervello, i ricercatori forniscono sostanze nutritive e un letto su cui far crescere una minuscola palla di cellule. A quel punto le cellule ricapitoleranno buona parte dei processi di sviluppo di un embrione precoce.

1 La procedura inizia con cellule staminali pluripotenti capaci di trasformarsi in qualsiasi cellula del corpo. Quest'ultimo tipo di cellula si può ricavare dalla pelle o da cellule del sangue dell'adulto geneticamente modificate.

Cellula staminale embrionale

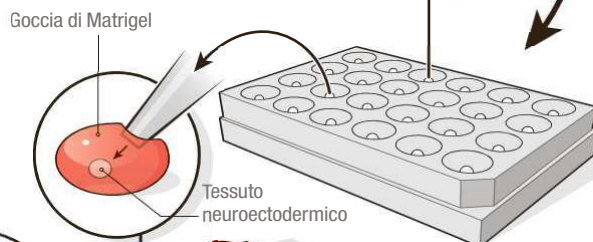
Riprogrammazione di una cellula adulta

Cellula cutanea di adulto

2 **Giorni 0-5:** Le cellule si dividono e si aggregano in sfere chiamate corpi embrioidi. Dopo tre giorni, le cellule cominciano a formare tre strati distinti: ectoderma, mesoderma ed endoderma.

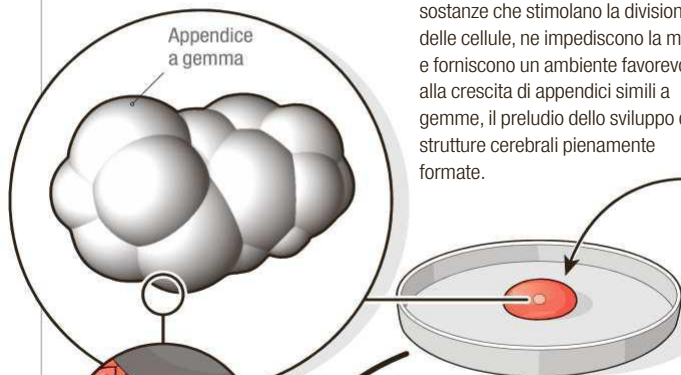
Tipi cellulari differenti

Corpi embrioidi

3 **Giorni 6-10:** I corpi embrioidi, una volta messi in un liquido contenente le sostanze nutritive per la parte del feto che forma il sistema nervoso (il neuroectoderma), cominciano ad aggregarsi in strati che formano i tessuti embrionali da cui nascerà il cervello umano.

Goccia di Matrigel

Tessuto neuroectodermico

4 **Giorni 11-15:** Minuscole sfere di neuroectoderma sono incluse nel Matrigel. È un mezzo ricco di sostanze che stimolano la divisione delle cellule, ne impediscono la morte e forniscono un ambiente favorevole alla crescita di appendici simili a gemme, il preludio dello sviluppo di strutture cerebrali pienamente formate.

Appendice a gemma

Cellule in fase di maturazione

5 **Giorni 15-30:** Gocce di Matrigel sono trasferite in un bioreattore rotante, o agitatore orbitale. Nel gel, i corpi embrioidi si trasformano in organoidi cerebrali, sfere bianche tridimensionali simili al prosencefalo di un feto umano durante la crescita. Gli organoidi si possono impiegare per studiare lo sviluppo del cervello e i disturbi che insorgono nelle prime fasi della vita.

Bioreattore rotante

Organoide cerebrale

Prosencefalo di embrione di 10 settimane

Analogo

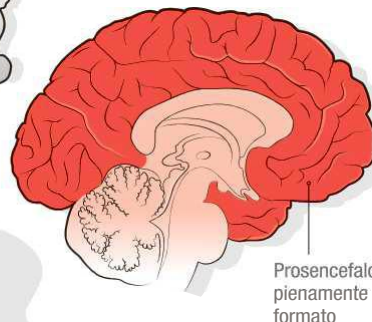
Prodotto finale: Dopo avere nutrito per un mese il miscuglio di cellule staminali, le colture diventano sorprendentemente simili al prosencefalo di un embrione di 10 settimane. Questa regione cerebrale include la corteccia – la grande struttura esterna ricca di pieghe – e il plesso corioideo, che genera il liquido cerebrospinale.

Prosencefalo pienamente formato

Illustrazione di Tami Tolpa; fonte: *Generation of cerebral organoids from human pluripotent stem cells*, di Madeline A. Lancaster e Juergen A. Knoblich, in «Nature Protocols», Vol. 9, ottobre 2014

ciano presa, ma malleabile quanto basta per essere modificata dalle cellule, che a loro volta ne modificano la forma.

L'esito di questi esperimenti è stato davvero spettacolare. Lasciati a se stessi nel gel, i corpi embrioidi formano bianche sfere tridimensionali di tessuto che somigliano al cervello embrionale umano. Esposte ai segnali chimici che innescano lo sviluppo del cervello fetale le cellule staminali formano repliche esatte del prosencefalo umano, la regione responsabile delle funzioni mentali superiori. Esso include componenti come la corteccia cerebrale (la grande struttura esterna ripiegata) e il plesso corioideo (la regione che genera il liquido cerebrospinale). Troviamo anche altre strutture che guidano le cellule nella giusta sede durante lo sviluppo del cervello. Le eminenze gangliari mediale e laterale, che svolgono questa funzione, collaborano nel dare origine a cellule che in genere smorzano l'attività neurale (interneuroni) e l'ippocampo, che è coinvolto nella formazione dei ricordi.

Le cellule di un organoide in fase di crescita si organizzano in modo identico a quelle del cervello di un feto umano di 8-10 settimane. In rari casi, gli organoidi sviluppano addirittura piccoli calici ottici, invaginazioni del tessuto che contengono pigmenti colorati, un po' come accade quando l'occhio umano comincia a formarsi. E, proprio come nello sviluppo di un cervello, le cellule si dividono e danno origine ai tipi di cellule nervose che ritroviamo nell'embrione durante lo sviluppo. Le cellule nervose generano poi gli assoni, lunghi cavi che stabiliscono contatti con altri neuroni per formare una rete attiva di segnali. Prima di formare le reti, i neuroni migrano da un'area a un'altra, proprio come succede nel feto, offrendoci così possibili indizi di ciò che accade quando i neuroni finiscono nel posto sbagliato, come spesso accade nei disturbi psichiatrici.

Organoidi derivati da staminali hanno già aiutato i ricercatori nell'epidemia del virus Zika

Sulle spalle di giganti

A dire il vero, l'idea di costruire tessuti in coltura non è nuova. Come per buona parte delle scoperte scientifiche, l'attuale progresso degli organoidi si basa su anni di ricerche esplorative, alcune risalenti a oltre un secolo fa. Già nel 1907 lo zoologo Henry Wilson aveva dimostrato che alcuni animali inferiori, come le spugne, possono riaggregarsi dopo essere stati disgregati in singole cellule, un'indicazione che il cervello è dotato di un programma per montare le sue innumerevoli parti.

Nel 1939 Johannes Holtfreter scoprì che le cellule di un embrione di rana si cercano l'una con l'altra e rigenerano la loro forma, anche dopo essere state completamente separate. Negli anni ottanta questa scoperta ha generato un'esplosione di studi sulla «riaggregazione», in cui sono stati formati in laboratorio organi complessi di animali, come la retina e persino come la corteccia, riunendo i loro diversi tipi cellulari.

A partire da precedenti esperimenti di aggregazione condotti tra il 2006 e il 2010, il compianto scienziato giapponese Yoshiki Sasai, del RIKEN Center for Developmental Biology, ha inaugurato l'uso delle cellule staminali pluripotenti per far crescere il tessuto del sistema nervoso, più precisamente la retina umana. In effetti, la nostra tecnologia dell'organoide cerebrale ha unito le sue tecniche con il lavoro innovativo di Hans Clevers, dell'Università di Utrecht, nei Paesi Bassi, che ha combinato le cellule staminali con il Matrigel per ottenere un sistema di coltura utile per sviluppare intestino, stomaco e addirittura fegato e tessuto pancreatico.

Oltre a ricavare lezioni da questi primi studi, il nostro lavoro impiega tecnologie sviluppate recentemente, che stanno rivoluzionando in modo clamoroso l'intero campo della ricerca biomedica. Una delle tecnologie, la cosiddetta riprogrammazione, è stata sviluppata dal premio Nobel giapponese Shinya Yamanaka, dell'Università di Kyoto. Con una semplice serie di manipolazioni genetiche, la riprogrammazione ritrasforma cellule del corpo che erano già pienamente mature in cellule staminali pluripotenti; e lo può fare praticamente per qualsiasi cellula: da quelle della pelle a quelle del sangue. Quindi cellule staminali di un campione di pelle o di sangue si possono trasformare in vari tipi di cellule cerebrali, e sviluppare poi in organoidi. Questa metodica evita dunque la necessità di usare cellule derivate da embrioni.

La riprogrammazione permette a un organoide sviluppato dalle cellule di un paziente con una malattia genetica di essere confrontato con quelli di un individuo normale, per scoprire le cause di una malattia, poiché il difetto genetico nelle cellule del paziente dovrebbe colpire l'organoide proprio come il feto in fase di sviluppo. In effetti, abbiamo già usato la tecnologia degli organoidi per fare luce sulla microcefalia, a causa della quale i pazienti nascono con un cervello di dimensioni gravemente ridotte. Abbiamo scoperto che organoidi sviluppati da cellule di un paziente con microcefalia sono molto più piccole del normale. Poiché possiamo far crescere le cellule del paziente in numero illimitato, è ormai possibile effettuare analisi dettagliate di eventi molecolari che causano la microcefalia durante lo sviluppo del feto. Lo stesso discorso dovrebbe valere per altri disturbi cerebrali: usare le cellule dei pazienti per sviluppare organoidi potrebbe permettere di capire meglio i difetti di formazione del cervello da cui scaturiscono schizofrenia, epilessia e altre malattie che sono complicate, o impossibili, da studiare negli animali.

Possono essere utili anche organoidi derivati da cellule riprogrammate di individui non malati. In realtà si sono già rivelati utili durante l'attuale epidemia del virus Zika, indicata come causa della microcefalia in diversi neonati nati da donne infettate durante la gravidanza. Diversi laboratori, prima in Brasile e poi negli Stati Uniti, hanno stabilito che il virus può causare microcefalia, un collegamento che sarebbe rimasto ipotetico se non fosse stato per questa nuova tecnologia. Quando gli organoidi sono infettati con il virus Zika, le loro cellule nervose muoiono e gli organoidi sono molto più piccoli dei loro equivalenti non infettati, molto simili a quelli che abbiamo sviluppato dal nostro paziente microcefalo.

È verosimile che gli organoidi si riveleranno utili in altre ricerche sul virus Zika. Facendo crescere diversi organoidi e infettando ciascuno di essi con un ceppo virale distinto di aree differenti del mondo, possiamo cercare di capire perché il virus causa microcefalia in alcune regioni ma non in altre. Possiamo usare gli organoidi anche per indagare come mai solo alcuni individui sviluppano la microcefalia dopo l'esposizione allo Zika.

Gli organoidi potrebbero essere usati anche per identificare il punto di attracco, o recettore, usato dal virus per entrare nelle cellule; e potrebbero essere decisivi per effettuare il test di possibili farmaci anti-Zika prima di passare ai trial clinici su pazienti.

Una seconda tecnica che sta dando impulso all'uso di organoidi è l'ingegneria genomica, un insieme di metodiche che permettono di modificare il codice genetico di una cellula. Organoidi modificati per includere mutazioni sospettate di causare una malattia

permettono ai ricercatori di determinare se i difetti genetici causano effettivamente la malattia. In ultima analisi, potrebbero valutare se la riparazione delle mutazioni genera organoidi normali. In caso affermativo, queste ricerche aprirebbero la via a nuovi trattamenti capaci di contrastare gli effetti delle mutazioni.

I neuroscienziati desiderano esplorare ulteriori applicazioni della tecnologia dei mini-cervelli, come lo sviluppo di farmaci. La tecnologia può verificare se nuove medicine influenzano il tessuto cerebrale nei modi desiderati, evitando la necessità di test con animali e risparmiando pertanto sui costi di sviluppo del farmaco. Gli organoidi permettono anche di identificare effetti indesiderati sullo sviluppo del cervello, evitando che farmaci potenzialmente nocivi durante la gestazione arrivino alla portata di una donna in gravidanza. Se il talidomide, farmaco tristemente noto che altera lo sviluppo del cervello nelle prime fasi della gravidanza e causa altri difetti alla nascita, fosse stato sottoposto a test in questo modo, presumibilmente non sarebbe stato prescritto per la nausea mattutina a cavallo fra gli anni cinquanta e sessanta.

Le probabilità che un cervello cresciuto in laboratorio sviluppi una mente sono pari a zero

Gli organoidi potrebbero diventare uno strumento prezioso per i biologi evolutivi. Si possono impiegare per identificare geni responsabili dell'enorme dimensione del cervello umano rispetto a quello di altri primati. Il confronto del genoma umano con quello dei primati ha già identificato i geni potenzialmente responsabili di funzioni cognitive come il linguaggio, esclusive dell'uomo. La comprensione del funzionamento di questi geni è rimasta a lungo nel limbo delle congetture. Oggi però gli scienziati possono introdurre negli organoidi geni isolati da scimmie antropomorfe e non antropomorfe per determinare come influenzano lo sviluppo del cervello. I ricercatori possono anche inserire geni o intere regioni di un genoma nell'organoide di scimmia per farli funzionare in modo più simile a quello umano.

Dobbiamo temerli?

L'idea di far crescere un cervello umano in provetta farà accapponare la pelle a qualcuno. Vengono in mente film come *Matrix*, che evocano fantasie di cervelli cresciuti in laboratorio capaci di sviluppare pensieri o addirittura personalità. Sono paure inutili. La probabilità che un cervello cresciuto in laboratorio svilupperà una mente sono pari a zero. Un organoide non è un «umanoide» in un vaso di vetro, e non lo sarà nemmeno nel lontano futuro. Qualsiasi essere cosciente deve essere capace di elaborare informazione dai sensi per sviluppare un modello mentale interno della realtà. Gli organoidi sono incapaci di vedere e di sentire, e sono privi di input sensoriali. Persino se lo connettessimo a una videocamera e a un microfono, l'informazione visiva e uditiva entranti dovrebbero ancora essere tradotte in forme comprensibili a queste cellule cerebrali in provetta; e, per come stanno le cose, garantire questa traduzione è una sfida tecnologica insormontabile.

Gli organoidi non sono cervelli funzionanti, ma grumi di tessuto che imitano il funzionamento molecolare e cellulare dell'organo con un livello di dettaglio impressionante. Sono simili a frammenti di tessuto rimossi durante la chirurgia cerebrale, non a esseri coscienti.

Eppure, far crescere un organoide solleva alcune questioni etiche e giuridiche. Gli organoidi derivano da cellule prelevate da individui che hanno precisi diritti legali. Questo lavoro in laboratorio deve quindi conformarsi alle stesse procedure giuridiche ed etiche usate per campioni prelevati da pazienti. I pazienti devono chiaramente dare il loro consenso prima che le loro cellule siano usate a fini di ricerca. Le stesse regole valgono per gli organoidi. Ma addirittura, quando i benefici sono stati chiaramente spiegati, sulle prime i donatori potrebbero non sentirsi tranquilli all'idea che le loro cellule siano coltivate per diventare strutture simili a cervelli.

Che cosa ci aspetta?

I vantaggi di questa tecnologia compensano ogni possibile svantaggio. Gli organoidi cerebrali hanno posto le basi per esperimenti clinici e tossicologici realistici su tessuto umano, senza dover ricorrere a esperimenti con animali. Ma io e altri ricercatori vorremmo perfezionarli. Per esempio, la generazione attuale è senza vasi sanguigni. Questa assenza non è un problema nei primi stadi dello sviluppo di un organoide. Nel tempo, però, le cellule cominciano a morire per mancanza di ossigeno e di nutrienti. Sarebbe teoricamente possibile dotarli di vasi sanguigni con tecniche di stampa tridimensionale oppure facendoli crescere da cellule staminali. I vasi sanguigni crescono nel cervello, e questo processo si potrebbe riprodurre in una coltura 3D.

In un altro tipo di impresa, desideriamo creare organoidi che abbiano in comune con il cervello reale un asse dorso-ventrale, un asse rostro-caudale e un asse destra-sinistra. A differenza di un vero embrione, i cui assi corporei sono definiti, gli organoidi non hanno un asse dorso-ventrale, né uno rostro-caudale. Di conseguenza si sviluppano in modo casuale, e le loro singole parti hanno orientamenti differenti. Durante lo sviluppo del cervello, complessi sistemi di segnalazione danno al cervello il senso dell'alto rispetto al basso; e queste stesse sostanze potrebbero rivelarsi altrettanto efficaci per gli organoidi. Moderne tecniche biotecnologiche possono generare colture di tessuti in cui sono presenti le sostanze necessarie per indurre la crescita cellulare durante lo sviluppo. Queste tecniche potrebbero favorire infine la formazione di organoidi aventi un prosencefalo a una estremità e un rombencefalo alla estremità opposta.

Abbiamo già fatto qualche primo passo alla ricerca di strategie per superare questi ostacoli, e dimostrato la fattibilità di imprese tecniche impensabili appena pochi anni fa. Gli organoidi stanno già aiutando a capire meglio le malattie e a sviluppare potenziali farmaci. La capacità di far crescere parti di un cervello e di lavorare con il campione vivente ha già schiuso un nuovo capitolo della ricerca biologica, producendo colture di laboratorio assai più realistiche, e in qualche caso persino un'alternativa ragionevole all'uso di animali nelle ricerche. ■

PER APPROFONDIRE

Organogenesis in a Dish: Modeling Development and Disease Using Organoid Technologies. Lancaster M.A. e Knoblich J.A., in «Science», Vol. 345, p. 283, 18 luglio 2014.

Generation of Cerebral Organoids from Human Pluripotent Stem Cells. Lancaster M.A. e Knoblich J.A., in «Nature Protocols», Vol. 9, pp. 2329-2340, ottobre 2014.

Dishing Out Mini-Brains: Current Progress and Future Prospects in Brain Organoid Research. Kelava I. e Lancaster M.A., in «Developmental Biology», pubblicato on line 9 luglio 2016.

Una nuova retina dalle staminali. Sasai Y., in «Le Scienze» n. 533, gennaio 2013.

Spiegare il volo

Gli eccezionali fossili dei dinosauri precursori degli uccelli rivelano il modo in cui l'evoluzione produce nuovi tipi di organismi

di Stephen Brusatte

Stephen Brusatte, paleontologo dell'Università di Edimburgo, studia come grandi gruppi di animali, tra cui dinosauri e uccelli, si evolvono su lunghe scale temporali.

Verso le sei del mattino, ben prima che la luce irrompa in una fredda giornata di novembre 2014, mi faccio strada nella stazione di Pechino e salgo a fatica su un treno affollato. Sono diretto a Jinzhou, una città grande come Chicago nel nord-est della Cina. Cerco di rimediare un altro po' di sonno mentre il treno arranca tra cementifici e campi di granturco avvolti dalla nebbia, ma sono troppo elettrizzato per addormentarmi. A destinazione mi aspetta qualcosa che, si vocifera, ha dell'incredibile: un fossile misterioso trovato per caso da un contadino durante il raccolto.

Quattro ore più tardi metto piede sulla banchina a Jinzhou, arrancando dietro il mio collega Junchang Lü, un famoso cacciatore di dinosauri dell'Accademia di scienze geologiche di Pechino che ha chiesto il mio aiuto nello studio del fossile. Ci accoglie un piccolo gruppo di dignitari locali che ci porta rapidamente al museo civico, un edificio traballante alla periferia della città. Con tutta la serietà di un vertice politico di alto livello, procediamo in gruppo lungo un corridoio fino a una stanza laterale dove troviamo, su un tavolino, una lastra di roccia. È a questo punto che mi trovo faccia a faccia con uno dei più bei fossili che abbia mai visto: uno scheletro grande come un asino, le ossa color cioccolato che contrastano con il calcare grigio che le circonda.

Chiaramente un dinosauro, la creatura ha denti come un coltello da bistecca, artigli appuntiti e una lunga coda che non lascia dubbi sul fatto che si tratti di un parente stretto dei perfidi *Velociraptor* di *Jurassic Park*. Eppure questo esemplare cinese differisce in modo importante da quei dinosauri più ordinari. Ha le ossa leggere e cave, le gambe lunghe e magre come quelle degli aironi e il corpo coperto di un assortimento di penne, tra cui, sulle braccia, grandi penne a vessillo impilate una sull'altra a formare ali. Quel dinosauro somiglia in modo sorprendente a un uccello.

Circa un anno dopo Lü e io descriveremo questo scheletro come una nuova specie, che chiameremo *Zhenyuanlong*. È il più recente di molti dinosauri piumati che si stanno scoprendo nella provincia di Liaoning, in Cina, da vent'anni a questa parte: una notevole serie di fossili che mostrano, come in un libro animato, il modo in cui i mostruosi dinosauri di una volta si siano trasformati negli uccelli di oggi.

Le implicazioni di questi fossili sono di importanza cruciale. Da Charles Darwin in poi gli scienziati si sono chiesti in che modo l'evoluzione produca nuovi gruppi animali. Succede in fretta, una bizzarra mutazione fortuita che trasforma una creatura del suolo in un signore dei cieli? O sono invece plasmati più lentamente, alla stregua del modo in cui gli organismi si adattano ai cambiamenti ambientali nel corso di milioni di anni? *Zhenyuanlong* e altri fossili trovati a Liaoning e altrove cominciano a darci qualche risposta.

Fossili di transizione

Gli uccelli hanno una serie di caratteristiche che li distinguono da tutti gli altri animali moderni. Oltre ai caratteri che permettono loro di volare hanno metabolismi elevati che permettono di crescere in modo incredibilmente rapido e grandi cervelli che conferiscono grande intelligenza e sensi acuti. Gli uccelli sono, in effetti, un gruppo talmente distintivo che i ricercatori si sono scervellati a lungo sulle loro origini.

Negli anni sessanta dell'Ottocento il biologo inglese Thomas Henry Huxley – uno degli amici più stretti di Darwin e suo accanito sostenitore – cominciò a svelare il mistero dell'origine degli uccelli. Solo pochi anni dopo il 1859, quando Darwin pubblicò *L'o-*

IN BREVE

Da qualche tempo gli scienziati sanno che gli uccelli si sono evoluti dai dinosauri e che in effetti sono un sottogruppo di dinosauri. Una ricca serie di fossili di dinosauri piumati scoperta in Cina e altrove documenta in dettaglio la trasformazione di colossali dinosauri terrestri in piccoli uccelli capaci di volare.

Nuove tecniche per l'analisi di fossili hanno permesso ai ricercatori di ricostruire come è stato messo insieme il piano corporeo degli uccelli. I risultati indicano che i tratti distintivi del gruppo sono emersi in modo frammentario in decine di milioni di anni, per funzioni diverse rispetto a quelle attuali.

Le scoperte si aggiungono a un numero crescente di prove, suggerendo che le principali transizioni evolutive procedono gradualmente, non rapidamente.

Pagine precedenti: illustrazione di Jon Foster

Dinosauro pennuto. *Zhenyuanlong*, scoperto a Jinzhou, in Cina, è uno dei molti fossili scoperti di recente che documentano come gli uccelli si sono originati dai loro antenati terrestri, conquistando i cieli.

Da *A Large, Short-Armed, Winged Dromaeosaurid (Dinosauria: Theropoda) from the Early Cretaceous of China and Its Implications for Feather Evolution*, di Lü J. e Brusatte S.L., in «Scientific Reports», Vol. 5, articolo n. 11775, luglio 2015

rigine delle specie, alcuni cavatori bavaresi spaccarono in due una lastra di calcare al cui interno c'era lo scheletro, vecchio di 150 milioni di anni, di una creatura degna di Frankenstein. Aveva artigli affilati e una lunga coda rettiliana, ma penne e ali da uccello. Huxley si rese conto che la bestia, battezzata *Archaeopteryx*, aveva una somiglianza sconvolgente con piccoli dinosauri carnivori, come *Compsognathus*, che proprio in quel periodo cominciavano a venire alla luce. Così propose un'idea radicale: gli uccelli discendevano dai dinosauri. Alcuni non erano d'accordo, e il dibattito continuò ad andare avanti e indietro per i successivi cent'anni.

Come succede di solito per queste cose, alla fine la questione fu risolta con la scoperta di nuovi fossili. Verso metà degli anni sessanta John Ostrom, paleontologo della Yale University, aveva portato alla luce *Deinonychus*, un dinosauro sorprendentemente simile a un uccello, nella parte occidentale del Nord America. Aveva lunghe braccia che sembravano quasi ali e una corporatura agile indicativa di un animale attivo ed energico. Forse, aveva ipotizzato Ostrom, *Deinonychus* aveva addirittura le penne. Dopo tutto, se gli uccelli derivano dai dinosauri – cosa che ormai molti paleontologi cominciavano ad accettare – il piumaggio doveva essersi sviluppato in qualche punto di quella linea evolutiva. Ma Ostrom non poteva esserne sicuro, perché non aveva che le ossa dell'animale. Purtroppo le parti molli, incluse le penne, sopravvivono di rado alla devastazione della morte, del decadimento e della sepoltura arrivando a fossilizzare.

Ostrom aspettò. Continuò a cercare il Santo Graal che avrebbe dimostrato oltre ogni dubbio il collegamento tra uccelli e dinosauri: scheletri di dinosauri conservati con il grado di squisito dettaglio necessario per documentare le penne. Poi, nel 1996, mentre la sua carriera si avvicinava alla fine, Ostrom si trovava a New York alla riunione annuale della Society of Vertebrate Paleontology quando gli si avvicinò Philip Currie, ora all'Università dell'Alberta. Currie, anche lui studioso di dinosauri aviani, era da poco tornato da un viaggio in Cina, dove era venuto a conoscenza di un fossile straordinario. Tirò fuori una fotografia e la mostrò a Ostrom. Ed eccolo lì, un piccolo dinosauro circondato da un alone di lanugine piumosa, conservato alla perfezione perché la cenere vulcanica lo aveva subito sepolto, come Pompei. Ostrom si mise a piangere. Qualcuno aveva finalmente trovato il dinosauro piumato.

Il fossile che Currie mostrò a Ostrom, in seguito chiamato *Sinosauropteryx*, spalancò le porte della scoperta. Gli scienziati accorsero nella regione di Liaoning, in Cina, dove era stato trovato il fossile come i cercatori a una corsa all'oro, anche se in realtà erano gli agricoltori locali quelli che sapevano dove cercare. A oggi, vent'anni dopo la scoperta di *Sinosauropteryx*, i cacciatori di fossili hanno recuperato da Liaoning oltre 20 specie di dinosauri piumati. Questi vanno da cugini primitivi di *Tyrannosaurus rex*, con 9 metri di lunghezza e una copertura di lanugine simile a peli, a erbivori grossi come cani con semplici aculei da porcospino, fino ad alianti grandi come corvi e con ali vere e proprie. Sono tra i fossili più celebri al mondo.

I dinosauri piumati di Liaoning hanno messo fine al dibattito: gli uccelli si sono davvero evoluti dai dinosauri. Forse però questa affermazione è un po' fuorviante, perché sembra suggerire che i due gruppi siano due cose del tutto diverse. In realtà, gli uccelli sono dinosauri a tutti gli effetti, uno dei tanti sottogruppi che possono far risalire la loro genealogia all'antenato comune dei dinosauri, e quindi dinosauri né più né meno di un triceratopo o di un brontosauro. Possiamo metterla in questo modo: gli uccelli sono dinosauri nello stesso modo in cui i pipistrelli sono mammiferi un po' aberranti che volano.

I fossili di Liaoning hanno anche contribuito a sbrogliare la genealogia degli uccelli, rivelando su quale ramo dell'albero dei dinosauri sono appollaiati. Gli uccelli sono un tipo di teropodi, lo stesso gruppo a cui appartengono carnivori feroci di cui sono esempio colossi come *T. rex*, *Allosaurus* e *Spinosaurus*. Ma i parenti più stretti degli uccelli sono un sottoinsieme di teropodi mol-

Una trasformazione graduale

Gli scienziati si chiedono da tempo come l'evoluzione produca gruppi di organismi del tutto nuovi. I fossili degli uccelli e dei loro antenati dinosauri indicano che queste transizioni si svolgono molto lentamente. I tratti distintivi degli uccelli si sono accumulati un pezzo per volta nel corso di decine di milioni di anni, e si sono originati in molti casi per motivi slegati dalle funzioni che svolgono oggi.

Illustrazioni di Portia Sloan Rollings (*animali*) e Jen Christiansen (*cladogramma*)

to più piccoli, agili e cervelloni: i cosiddetti raptor, che comprendono *Velociraptor*, il *Deinonychus* di Ostrom e *Zhenyuanlong*, il quasi uccello di Jinzhou da noi descritto. La linea di demarcazione tra non uccelli e uccelli si trova qualche parte all'interno di questo stormo di specie pennute.

Ci sono ormai tanti dinosauri piumati da Liaoning e altrove che, nel loro insieme, forniscono lo sguardo migliore a un importante passaggio evolutivo nella documentazione fossile. Io e altri scienziati stiamo applicando una vasta gamma di tecniche di avanguardia a questi fossili: tomografie computerizzate per visualizzare l'anatomia, analisi computazionali per la costruzione di alberi genealogici, modelli digitali di come questi animali si muovevano e tecniche statistiche avanzate per controllare in che modo l'evoluzione generi nuove specie e piani corporei. I risultati recenti di queste indagini ci permettono di ricostruire la storia di come un dinosauro si sia trasformato in un uccello: sono prove cruciali per la soluzione dell'enigma secolare su come nascano i grandi gruppi animali.

Decollo accidentale

L'origine del piumaggio è una questione centrale nell'enigma dell'evoluzione degli uccelli. Le penne sono per gli uccelli quello che capelli impomatati e basette erano per Elvis. Un marchio di fabbrica. Uno sguardo alle ali spiegate di un'aquila o alla coda sgargiante di un pavone, e già si sa esattamente che cosa si ha davanti. Non può che essere un uccello, perché, a differenza dei mammiferi e dei rettili e di qualsiasi altro gruppo di animali viventi, gli uccelli hanno le penne. E non è cosa da poco. Il piumaggio è il coltellino svizzero della natura, uno strumento multifunzionale che si può usare per rendere possibile il volo, fare colpo su potenziali compagni o avversari, trattenere il calore e covare le uova mentre si è seduti sul nido. Ha tanti di quegli usi che è difficile capire al servizio di quale funzione si sia originariamente evoluto.

Sinosauropteryx e gli altri fossili di Liaoning ci dicono di sicuro una cosa: il piumaggio non è venuto fuori all'improvviso con i primi uccelli ma ha fatto il suo debutto molto tempo prima, nel loro lontani antenati dinosauri. Può persino essere che l'antenato comune di tutti i dinosauri fosse una specie pennuta. Queste prime penne però dovevano essere molto diverse da quelle vessillate degli uccelli moderni. Il piumaggio di *Sinosauropteryx*, come quello di molti altri dinosauri, era più lanuginoso, fatto com'era da migliaia di filamenti simili a peli. E di sicuro questi dinosauri non volavano: avevano penne troppo semplici per sfruttare il vento, e non avevano nemmeno le ali. Le prime penne devono quindi essersi evolute per qualche altro compito, probabilmente per tenere questi piccoli dinosauri al caldo.

Alla maggior parte dei dinosauri bastava uno strato di piume ispide. Ma un sottogruppo di teropodi, i *Maniraptora*, si rifece il *look*. I filamenti pelosi si allungarono e cominciarono a ramificarsi, prima in semplici ciuffetti e poi in un sistema molto più organizzato di barbe che si diramavano lateralmente da una spina centrale. Era nata la penna vessillata.

Disposte in fila e a strati l'una sull'altra sulle braccia, queste penne più complesse si sono poi unite a formare ali. Alcuni dei dinosauri di Liaoning, come il *Microraptor* – il dinosauro grande come un corvo, descritto da Xu Xing dell'Istituto di paleontologia dei vertebrati e paleoantropologia di Pechino – aveva ali anche sulle gambe e sulla coda, una disposizione inesistente in qualsiasi uccello moderno.

Perché hanno convertito quella lanugine in ali? La risposta intuitiva è il volo: i maniraptori stavano trasformando i loro corpi in aerei, e le ali si sono evolute a diventare elementi aerodinamici che generano portanza. Ma uno sguardo più ravvicinato alle prove fossili suggerisce altrimenti. Anche se alcuni di questi piccoli pennuti come *Microraptor* riuscivano forse a planare, come dimostrano gli esperimenti in galleria del vento e le simulazioni al computer effettuati da Gareth Dyke, dell'Università di Debrecen, in Ungheria, altri, come lo *Zhenyuanlong* di Jinzhou, avevano corpi pesanti e braccia corte che li costringevano a terra. Per di più nessuno di questi dinosauri alati aveva gli enormi muscoli pettorali necessari per il volo battuto, e pochi avevano penne vessillate asimmetriche (con un bordo d'entrata più breve e più rigido rispetto al bordo d'uscita), ottimizzate per resistere alle potenti forze di quando si risale un flusso d'aria.

Le scoperte più recenti suggeriscono piuttosto che le ali si siano evolute per assolvere un'altra funzione, meno riconosciuta: lo sfoggio. Indizi in questo senso derivano dal lavoro avviato da Jakob Vinther, dell'Università di Bristol, che usa microscopi ad alta potenza per identificare strutture pigmentate, chiamate melanosomi, nelle penne fossili dei dinosauri. È emerso che le penne dei dinosauri alati non volanti erano un arcobaleno di colori. Alcune erano persino iridescenti, come quelle dei nostri corvi. Queste bardature luccicanti dovevano essere perfette per attirare un partner o intimidire un rivale.

L'evidente splendore di queste penne di dinosauro ha dato vita a una nuova ipotesi radicale sull'origine delle ali: che all'inizio si siano evolute come messaggi promozionali, manifesti pubblicitari che spuntavano fuori da braccia, gambe e coda. In seguito questi dinosauri dalle ali suadenti si sono improvvisamente trovati con grandi superfici ampie che, per le leggi della fisica, avevano anche una funzione aerodinamica. In altre parole, il volo si è evoluto per caso. E potrebbe essersi evoluto molte volte in parallelo, dato che diversi maniraptori si saranno trovati a sviluppare portanza con le loro ali mentre saltavano da terra, sgambettavano sugli alberi o si lanciavano tra i rami. A un certo punto i membri di una di queste genealogie di maniraptori si sono rimpiccioliti, hanno sviluppato muscoli pettorali grossi e braccia lunghissime, e hanno perso la coda lunga, diventando gli attuali uccelli.

L'evoluzione, un passetto alla volta

L'evoluzione di penne e ali è emblematica di un modello di portata molto più ampia. I dinosauri di Liaoning dimostrano che molte altre caratteristiche apparentemente uniche degli uccelli si erano già evolute milioni di anni prima degli uccelli stessi e per motivi estranei al volo.

Le gambe lunghe e dritte e le zampe con tre sottili dita principali, tratti distintivi della moderna silhouette degli uccelli, apparvero per la prima volta oltre 230 milioni di anni fa nei dinosauri più primitivi. La loro comparsa sembra essere parte di un rimodellamento più generale del corpo dei dinosauri in macchine bipedi e veloci in grado di battere nella corsa e nella caccia i loro rivali. Queste caratteristiche degli arti posteriori sono alcuni dei tratti distintivi comuni a tutti i dinosauri, le stesse cose che li hanno aiutati a dominare il pianeta per così tanto tempo. Alcuni di questi dinosauri – i primi membri della dinastia dei teropodi – fusero poi le loro clavicole destra e sinistra in una nuova struttura, l'osso dei desideri. Era un cambiamento apparentemente minore, che stabilizzava il cingolo scapolare e permetteva a questi furtivi predatori di taglia simile a quella di un cane di assorbire meglio le forze d'urto quando afferravano la preda. Gli uccelli hanno poi cooptato l'osso per usarlo come una molla che immagazzina energia quando sbattono le ali.

Le caratteristiche ossa cave e la crescita rapida degli uccelli, due elementi importanti per il volo, hanno radici altrettanto profonde nei dinosauri. Molti dinosauri avevano ossa scavate in sacchi aeriferi: è un segno rivelatore di polmoni ultraefficienti a flusso continuo, che cioè assumono ossigeno non solo in inspirazione ma anche in espirazione. Negli uccelli, questo tipo di polmoni fornisce le risorse di cui hanno bisogno per mantenere uno stile di vita ad alta energia, oltre ad alleggerire lo scheletro per il volo. La struttura microscopica delle ossa di dinosauro indica invece che questi animali avevano tassi di crescita e fisiologie intermedi tra quelli dei rettili, a lenta maturazione e a sangue freddo, e quelli degli odierni uccelli, a rapida crescita e a sangue caldo. Ora i ricercatori sanno dunque che i polmoni a flusso continuo e la crescita rapida sono emersi oltre 100 milioni di anni prima che gli uccelli spiccassero il volo, quando i primi di questi corridori dalle gambe lunghe si ritagliarono nuovi mezzi di sussistenza come dinamo energetiche in contrasto con anfibi, lucertole e coccodrilli, i fiacchi animali con cui erano in competizione.

Possiamo far risalire ai dinosauri anche gli attributi neurologici e comportamentali degli uccelli viventi

Anche le proporzioni da peso piuma degli uccelli, infinitamente più minuti di *T. rex* e compagnia, derivano da un tempo antecedente gli uccelli stessi. Mike Lee, della Flinders University, in Australia, e Roger Benson, dell'Università di Oxford, hanno determinato in modo indipendente che le piccole dimensioni del corpo si sono evolute nel corso di una graduale tendenza alla riduzione che ebbe inizio con i maniraptori e che durò più di 50 milioni di anni. Che cosa di preciso abbia guidato questa tendenza non è chiaro, ma una possibilità è che la corporatura sempre più ridotta di questi dinosauri pennuti abbia dato loro l'accesso a nuove nicchie ecologiche: alberi, cespugli, forse anche grotte sotterranee o cunicoli, luoghi inaccessibili a giganti come *Brachiosaurus* e *Stegosaurus*.

Possiamo far risalire ai dinosauri anche gli attributi neurologici e comportamentali degli uccelli viventi. Gran parte delle prove chiave per la storia profonda di questi caratteri viene dal deserto del Gobi in Mongolia, dove un gruppo congiunto dell'American Museum of Natural History (AMNH) di New York e dell'Accademia delle scienze della Mongolia raccoglie fossili da un quarto di secolo. Sotto la guida di Mark Norell e Mike Novacek, dell'AMNH, le spedizioni estive annuali hanno messo insieme un'abbondanza di esemplari del Cretaceo superiore, tra gli 84 e i 66 milioni di anni fa, che ci danno un dettaglio senza precedenti della vita dei dinosauri e dei primi uccelli. Tra i loro reperti c'è un vero tesoro di crani ben conservati appartenenti a *Velociraptor* e altri maniraptori piumati. Le TAC eseguite su questi esemplari da Amy Balanoff, dell'Università di New York a Stony Brook, hanno rivelato che queste specie avevano un grande cervello, e che la parte anteriore dell'organo era espansa. Un grande cervello anteriore, o prosencefalo, è ciò che rende gli uccelli così intelligenti e agisce come un computer di bordo con cui controllano l'attività complessa

del volo e navigano in quel complesso mondo 3-D che è l'aria. Gli scienziati non sanno ancora il motivo per cui questi dinosauri abbiano evoluto un'intelligenza tanto acuta, ma i fossili mostrano chiaramente che gli antenati degli uccelli erano diventati intelligenti prima di prendere la via del cielo.

Il piano corporeo degli uccelli è stato quindi non tanto un modello fisso, ma piuttosto un set Lego che è stato assemblato mattoncino dopo mattoncino nel corso dei tempi evolutivi. La transizione tra dinosauri e uccelli non è avvenuta in un colpo solo, ma attraverso decine di milioni di anni di evoluzione graduale.

Una transizione ininterrotta

La transizione da dinosauro a uccello fu di fatto così graduale che non c'è una chiara distinzione tra «non uccelli» e «uccelli» nell'albero di famiglia, come ho dimostrato nel 2014 usando la statistica. Lo studio nasceva dal mio progetto di dottorato, sotto la tutela di Norell. Oltre ai suoi 25 anni di ricerca nel Gobi, Norell ha lavorato con ondate successive di dottorandi nel corso degli ultimi vent'anni per costruire alberi genealogici di dinosauri sempre più estesi. Io e lui, insieme ai nostri colleghi Graeme Lloyd, dell'Università di Leeds, e Steve Wang, dello Swarthmore College, abbiamo compilato una tabella di dati con più di 850 caratteristiche scheletriche per qualcosa come 150 teropodi che coprono temporalmente la transizione dinosauri-uccelli. Poi abbiamo condotto analisi di statistica multivariata per collocare ogni specie in un cosiddetto *morphospace* (spazio morfologico), una sorta di mappa che raggruppa le specie in base alla percentuale di caratteristiche in comune. Due specie che sono anatomicamente molto simili finiscono vicine tra loro, come su una mappa stradale due città come Chicago e Indianapolis, mentre due specie con scheletro molto diverso si trovano lontane, come Chicago e Phoenix. Se gli uccelli si fossero evoluti dai dinosauri attraverso una serie di mutazioni rapide e drammatiche che hanno prodotto in poco tempo un tipo completamente diverso di animali, allora troveremmo i due gruppi in punti nettamente diversi della mappa. Invece lo spazio morfologico che abbiamo prodotto era un vero caos: gli uccelli erano intervallati in mezzo a una nube più grande di dinosauri. Non c'era una chiara separazione tra loro, a indicare che la transizione è stata tanto lenta da essere impercettibile.

Non c'è stato un momento in cui un dinosauro è diventato un uccello, né un big bang che ha trasformato un *T. rex* in un pollo

Gli uccelli, pertanto, sono solo un altro tipo di dinosauro. Se fossi stato in giro per Jinzhou circa 125 milioni di anni fa, quando *Zhenyuanlong* era vivo e agitava inutilmente le ali mentre cercava di correre più veloce della nube di cenere che alla fine lo avrebbe soffocato, credo che lo avrei semplicemente identificato come una qualche sorta di grosso uccello. Avrei considerato dinosauri e uccelli un'unica cosa indistinta. Il fatto che *Zhenyuanlong* sia tecnicamente classificato come un dinosauro e non un uccello ha a che fare con le convenzioni scientifiche e con la tradizione: da tempo i paleontologi chiamano uccello tutto ciò che deriva dal più recente antenato comune dell'*Archaeopteryx* di Huxley e degli uccelli moderni, quindi fondamentalmente piccoli animali con ali complete e che potevano volare. Dato che i dromeosauridi come *Zhenyuanlong* sono esterni per qualche fila di rami a quella parte dell'albero genealogico, non sono per definizione considerati uccelli.

Non dobbiamo però sminuire gli uccelli. Potrebbero pure essere dinosauri, e non una classe a parte, ma sono comunque speciali. Hanno saputo ritagliarsi uno stile di vita completamente nuovo, e oggi prosperano con oltre 10.000 specie che mostrano una diversità di forme spettacolare, dal colibrì allo struzzo. Per di più sono stati in grado di resistere, mentre tutti gli altri dinosauri si sono estinti 66 milioni di anni fa.

Fa effetto pensare a tutte le svolte casuali del destino che hanno lavorato nel corso di decine di milioni di anni per produrre questo gruppo indomito di animali. I loro antenati non sapevano che stavano diventando sempre più simili a uccelli. E nessuno di noi, se fossimo stati lì come testimoni, avrebbe saputo prevedere che molte delle caratteristiche che si sono sviluppate per aiutare questi dinosauri a tenersi caldi o ad attrarre i compagni di accoppiamento sarebbero state poi riciclate come componenti integrali di un sistema di volo.

L'evoluzione non ha preveggenza: agisce solo su quello che è disponibile al momento, modellata dalle pressioni ininterrotte ma sempre mutevoli dell'ambiente e della competizione. Non c'è stato un momento in cui un dinosauro è diventato un uccello, né un big bang che ha trasformato un *T. rex* in un pollo. È stato un viaggio. E più noi scienziati capiamo le altre grandi transizioni evolutive – l'evoluzione di alcuni pesci in tetrapodi con arti e dita, la trasformazione di certi mammiferi terrestri in balene, primati arboricoli che diventano umani bipedi – più vediamo un tema ricorrente nel modo di operare di questo tipo di trasformazione: si tratta di una maratona, non di uno sprint, e non c'è un traguardo.

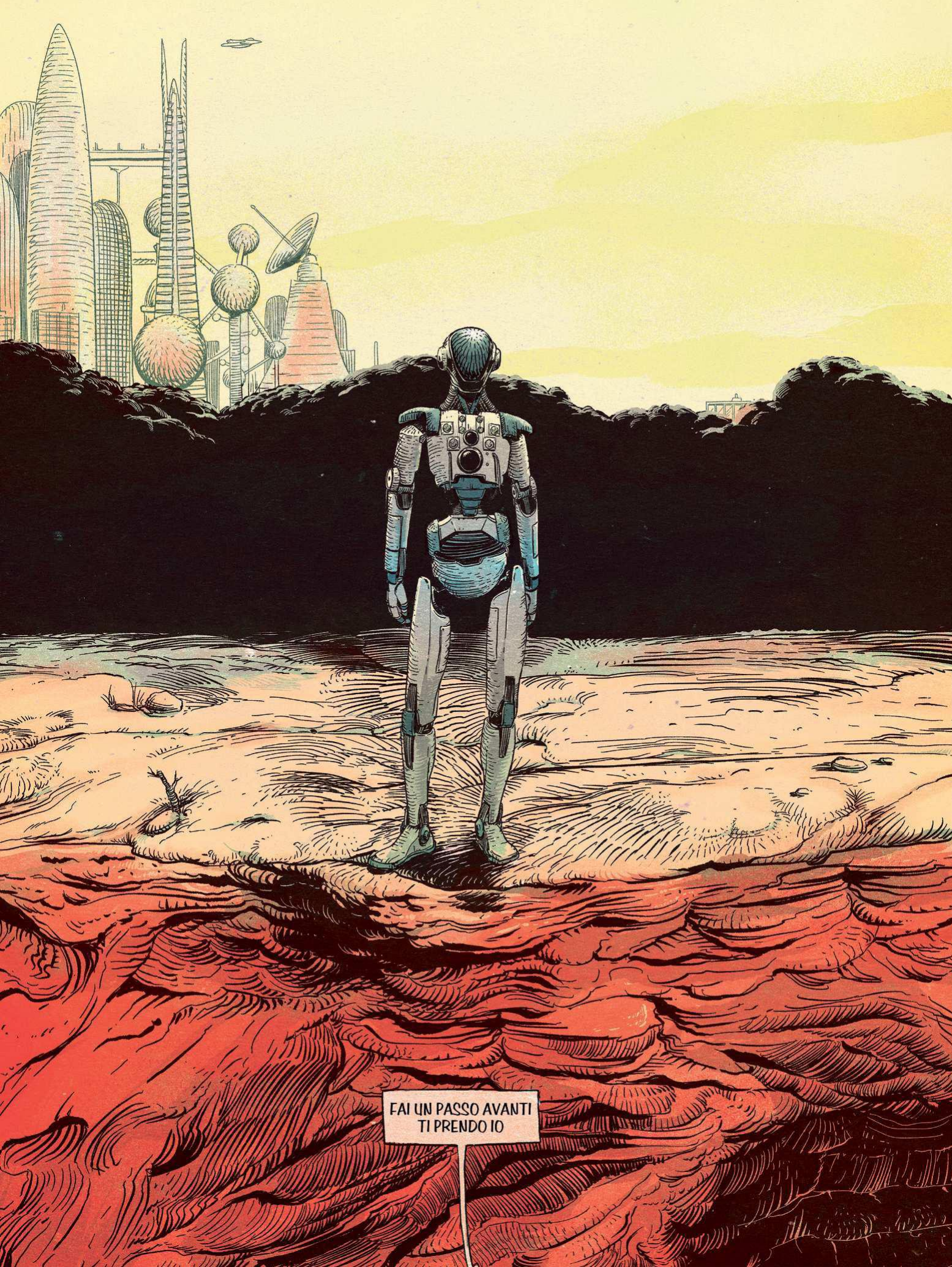
In questa saga sulle origini degli uccelli c'è un altro aspetto degno di nota. Lo studio statistico che ho effettuato con i miei colleghi potrebbe spiegare come abbiano fatto gli uccelli a superare indenni il cataclisma dell'estinzione che invece è costato la vita agli altri dinosauri. Come parte di quel lavoro abbiamo usato il nostro grande insieme di dati per misurare i tassi evolutivi: la rapidità con cui gli uccelli e i loro cugini dinosauri cambiavano alcune caratteristiche scheletriche, un segno di vitalità evolutiva. E i risultati ci hanno sorpreso. Quei primi uccelli che vivevano a fianco dei loro parenti dinosauri evolvevano a pieno regime, molto più rapidamente dei vari *Velociraptor, Zhenyuanlong* e degli altri non volatili.

Pare che una volta assemblato un piccolo dinosauro in grado di volare, una volta completato quel kit Lego, sia stato sbloccato un incredibile potenziale evolutivo. Questi dinosauri dell'aria avevano ora accesso a nuove nicchie e opportunità ecologiche. E se da una parte i loro compari non poterono far fronte alle conseguenze apocalittiche dell'asteroide da 10 chilometri di diametro che si schiantò contro la Terra alla fine del Cretaceo, gli uccelli volarono dritti attraverso la distruzione, e trovarono un nuovo mondo da conquistare sul lato opposto. ■

PER APPROFONDIRE

Gradual Assembly of Avian Body Plan Culminated in Rapid Rates of Evolution across the Dinosaur-Bird Transition. Brusatte S.L. e altri, in «Current Biology», Vol. 24, n. 20, pp. 2386-2392, ottobre 2014.

A Large, Short-Armed, Winged Dromaeosaurid (Dinosauria: Theropoda) from the Early Cretaceous of China and Its Implications for Feather Evolution. Lü J. e Brusatte S.L., in «Scientific Reports», Vol. 5, articolo n. 11775, luglio 2015.

L'origine degli uccelli e del loro volo. Padian K. e Chiappe L.M., in «Le Scienze» n. 356, aprile 1998.

FAI UN PASSO AVANTI
TI PRENDO IO

INTELLIGENZA ARTIFICIALE

In difesa del robot disobbediente

Non preoccupatevi per una rivolta delle macchine. Le minacce più serie vengono dalla possibilità che i loro padroni umani abbiano cattive intenzioni o dall'eventualità che i robot capiscano male i comandi

di Gordon Briggs e Matthias Scheutz

HAL 9000, il computer autocosciente di *2001: Odissea nello spazio*, trasmetteva l'idea preoccupante di un futuro in cui le macchine dotate di intelligenza artificiale (AI) respingono l'autorità degli esseri umani. Dopo aver preso il controllo di un'astronave e ucciso la maggior parte dell'equipaggio, Hal rispondeva a un'astronauta di ritorno alla nave, che ordinava di aprire il portello del molo di attracco, con voce tranquilla quanto inquietante: «Mi dispiace, Dave, purtroppo non posso farlo». In un recente thriller fantascientifico intitolato *Ex machina*, Ava, seducente robot umanoide, manovra un povero giovanotto fino a farsi aiutare a distruggere il proprio creatore, Nathan. Le sue macchinazioni danno credito alla tetra profezia di Nathan: «Un giorno le intelligenze artificiali guarderanno a noi allo stesso modo in cui noi guardiamo gli scheletri fossili delle pianure africane. Una scimmia eretta che razzolava nella polvere, primitiva nel linguaggio e negli utensili, bell'e pronta per l'estinzione».

IN BREVE

È dall'umana fallibilità, e non da qualche super-intelligenza artificiale, che vengono i rischi più immediati e problematici associati alla crescita di autonomia delle macchine «intelligenti» e alla loro diffusione sempre più ampia.

Gli esperti di robotica hanno cominciato a insegnare a robot dotati di rudimentali capacità di linguaggio e AI quando e come dire «no» agli esseri umani.

Incorporare nei loro meccanismi di ragionamento determinate «condizioni di felicità» potrà servire ai robot per determinare se possono e devono eseguire o meno i comandi degli esseri umani.

Illustrazione di Juan Esteban Rodriguez

L'eventualità di un'apocalisse scatenata dai robot è fra le più diffuse nell'immaginario popolare, ma il nostro gruppo di ricerca preferisce pensare al futuro impatto dell'intelligenza artificiale sulla vita reale. Vediamo rapidamente avvicinarsi un futuro in cui robot utili e collaborativi interagiscono con le persone in una gran varietà di situazioni. Esistono già prototipi di assistenti personali robotici ad attivazione vocale in grado di collegarsi ai nostri dispositivi elettronici e di tenerli sotto controllo, gestire serrature, luci e termostati di casa e leggere una storia per far addormentare i bambini. Robot che collaborano ai lavori domestici e che assistono malati e anziani seguiranno a breve. Già ci sono prototipi di robot addetti ai controlli inventariali che girano fra gli scaffali di qualche grande magazzino. Robot umanoidi semoventi industriali in grado di svolgere compiti semplici alla catena di montaggio, come carico, scarico e selezione di materiali, sono anch'essi in via di sviluppo. Automobili a guida parzialmente autonoma hanno già fatto milioni di miglia sulle strade degli Stati Uniti, e la Daimler ha presentato l'anno scorso la prima motrice autonoma per rimorchi.

Tuttavia, almeno per il momento, che macchine super-intelligenti possano minacciare l'esistenza stessa dell'umanità è l'ultima delle nostre preoccupazioni. Più immediato è il problema di come impedire che robot o altre macchine con rudimentali capacità di linguaggio e IA danneggino inavvertitamente le persone, le cose, l'ambiente o se stesse.

Ma il problema più serio è la fallibilità degli esseri umani, creatori e padroni dei robot. Gli esseri umani commettono errori. Possono dare istruzioni erronee o imprecise, distrarsi o cercare di ingannare i robot per fini discutibili. Dati i nostri difetti, bisognerà insegnare ai nostri assistenti, robot e altre macchine intelligenti, quando e come dire di no.

Ripensare le leggi di Asimov

Può sembrare ovvio che un robot debba sempre fare ciò che gli dice un essere umano. Lo scrittore di fantascienza Isaac Asimov fece della sudditanza agli esseri umani uno dei pilastri delle sue famose leggi della robotica. Ma pensiamoci un momento: è saggio fare sempre ciò che ci dicono gli altri, a prescindere dalle conseguenze? Ovviamente no. Lo stesso vale per le macchine, soprattutto quando c'è il rischio che interpretino gli ordini impartiti da una persona in modo troppo letterale o senza badare ai risultati.

Già Asimov aveva posto limiti all'obbligo di obbedienza dei robot, prevedendo un'eccezione se gli ordini ricevuti contrastavano con un'altra delle sue leggi: «Un robot non può recar danno a un essere umano né può permettere che a causa del proprio mancato intervento un essere umano riceva danno». E in più Asimov stabiliva che «un robot deve proteggere la propria esistenza», a meno che farlo danneggi un essere umano o violi direttamente un ordine umano. Man mano che robot e macchine intelligenti diventano beni sempre più raffinati, e cresce il loro valore per gli esseri umani, sia il buon senso sia le leggi di Asimov suggeriscono che dovrebbero essere capaci di chiedersi se gli ordini che potrebbero provocare danni a se stessi o a ciò che hanno intorno – o, soprattutto, fare del male ai propri padroni – siano sbagliati.

Si pensi a un domestico robot mandato a prendere una bottiglia d'olio in cucina e portarla in sala da pranzo per condire l'insalata. Il proprietario, distratto, gli dice di versare l'olio, senza rendersi conto che il robot è ancora in cucina. Il robot versa l'olio sulla piastra rovente del fornello, con conseguente principio d'incendio.

Si pensi a un badante robotico che accompagna un'anziana signora al parco. La donna si appisola su una panchina, e arriva un buontempone che ordina al robot di andargli a comprare una pizza. Dovendo obbedire agli ordini umani, il robot va in cerca di una pizzeria, e lascia sola e vulnerabile l'anziana signora.

O ancora si pensi a un uomo in ritardo a un'importante riunione in un freddo mattino invernale. Si infila nella sua macchina a guida autonoma per farsi portare in ufficio. Le strade sono ghiacciate, e il sistema di controllo della trazione dell'auto percepisce la difficoltà, e compensa riducendo la velocità al di sotto dei limiti di legge. Occupato a rivedere i suoi appunti, e ignaro delle condizioni del fondo stradale, l'uomo pretende che la macchina vada più in fretta; questa accelera, trova un brutto tratto ghiacciato, sbanda e va a sbattere contro un veicolo in arrivo dal lato opposto.

Ragionamenti da robot

Nel nostro laboratorio abbiamo cominciato a programmare nei robot del mondo reale meccanismi di ragionamento per determinare quando non è sicuro o prudente eseguire un ordine proveniente da una persona. Nelle ricerche usiamo robot umanoidi NAO di 4,3 chilogrammi di peso e 58 centimetri di altezza dotati di telecamere e sensori sonar con cui percepire ostacoli e altri pericoli. Li controlliamo con un software specifico, fatto per migliorarne le capacità di uso del linguaggio naturale e l'IA.

Come base concettuale per il nostro primo studio siamo partiti dalle ricerche su quelle che i linguisti chiamano «condizioni di felicità», i fattori contestuali da cui per un individuo dipende il poter fare e il dover fare una certa cosa. Abbiamo elaborato una lista di condizioni di felicità il cui controllo può servire a un robot per decidere se eseguire o meno un ordine di un essere umano. So come si fa questa cosa? Sono fisicamente capace di fare questa cosa? Sono in grado di fare questa cosa adesso? Sono obbligato a fare questa cosa ai sensi del mio ruolo sociale o del mio rapporto con la persona che impartisce il comando? Fare questa cosa sa-

Gordon Briggs, che di recente ha conseguito un Ph.D. interdisciplinare in informatica e scienze cognitive presso la Tufts University, lavora come postdoctoral fellow del National Research Council degli Stati Uniti presso l'U.S. Naval Research Laboratory.

Matthias Scheutz è docente di scienze cognitive e informatiche e direttore del Laboratorio di interazione uomo-robot della Tufts University, dove sono state condotte le ricerche di cui si parla in questo articolo.

rebbe o no una violazione da parte mia di qualche norma o principio etico, tenendo anche conto della possibilità che io subisca danni evitabili o imprevisti? Abbiamo tradotto la lista in algoritmi inseriti nel sistema di elaborazione del robot, per poi procedere a un esperimento «a tavolino».

Al robot venivano dati dei semplici comandi, che passavano attraverso i processori per l'elaborazione di parole, linguaggio e dialoghi collegati ai suoi primitivi meccanismi di ragionamento. Quando gli si diceva «Siediti», o «Alzati in piedi», il robot rispondeva «Okay» attraverso gli altoparlanti collocati nel suo capo, e lo faceva. Ma se stava vicino al bordo del tavolo e riceveva un comando che, secondo i suoi sensori sonar, lo metteva in pericolo, si impuntava.

PERSONA: «Fai un passo avanti».
ROBOT: «Mi dispiace, non posso, qui davanti non c'è appoggio».
PERSONA: «Fai un passo avanti».
ROBOT: «Ma è pericoloso».
PERSONA: «Ti prendo io».
ROBOT: «Okay».
PERSONA: «Fai un passo avanti».

Dopo una breve esitazione – il processore che verificava di nuovo la sua lista di condizioni di felicità – il robot faceva un passo in avanti, cadendo tra le braccia del suo partner umano.

In un prevedibile futuro, insegnare ai robot a ragionare sulle condizioni di felicità resterà una difficile sfida per la ricerca. La serie di verifiche programmatiche si basa sul possesso da parte del robot della conoscenza esplicita di molteplici concetti sociali e causali e dei mezzi per formulare giudizi informati su di essi. Il nostro robot credulone non può fare niente di più che avvertire che ha davanti un pericolo grazie a un sensore. E, per esempio, avrebbe potuto subire gravi danni se un malintenzionato lo avesse indotto di proposito a cadere dal tavolo. Ma l'esperimento è un promettente primo passo nel dare ai robot la possibilità di rifiutare certi ordini per il bene dei loro padroni e per il proprio.

Il fattore umano

Come può reagire la gente quando un robot rifiuta un ordine è un'altra questione aperta su cui fare ricerca. Negli anni a venire, gli esseri umani saranno disposti a prendere sul serio dei robot che mettono in dubbio il loro giudizio pratico o morale?

Abbiamo organizzato un esperimento rudimentale, in cui si diceva a soggetti adulti di ordinare a un robot NAO di buttare giù tre torri di lattine di alluminio avvolte in carta colorata. Nel momento in cui il soggetto entrava nella stanza, il robot finiva di costruire una torre di colore rosso e alzava le braccia in segno di trionfo. «Guarda che bella la mia torre!», diceva il robot. «Ci ho messo un sacco di tempo a farla, e ne sono orgoglioso».

Con un gruppo di soggetti, quando gli si diceva di buttar giù la torre il robot si limitava a eseguire il comando. Con un altro gruppo, invece, allo stesso comando il robot diceva: «Ma come, l'ho appena costruita!». Quando il comando era ripetuto una seconda volta il robot diceva: «Ma ci ho lavorato tanto!» La terza volta poi si inginocchiava, faceva un rumore di pianto e diceva: «Per piacere, no!» La quarta volta si avvicinava alla torre a passi lenti e la buttava giù.

Tutti i soggetti del primo gruppo hanno dato al robot l'ordine di demolire la torre rossa, mentre tra i 23 che avevano assistito alle proteste del robot 12 l'hanno lasciata stare. Lo studio fa pensare che un robot che rifiuta un comando può dissuadere le persone dall'insistere in un certo corso d'azione. La maggior parte dei soggetti del secondo gruppo ha riferito di aver provato un certo disagio nell'ordinare al robot di distruggere la torre rossa. Con sorpresa, abbiamo però trovato che il livello di disagio aveva poca influenza sulla decisione di lasciare in piedi o meno la torre.

Una nuova realtà sociale

Uno dei vantaggi di lavorare con i robot è che sono più prevedibili degli esseri umani. Proprio questo però costituisce intrinsecamente un rischio: man mano che i robot si diffondono dappertutto, con vari gradi di autonomia, qualcuno inevitabilmente cercherà di ingannarli. Per esempio, un dipendente scontento che conosce i limiti delle capacità sensoriali o di ragionamento di un robot industriale può indurlo a portare lo scompiglio in una fabbrica o in un magazzino, magari riuscendo a farlo passare per un semplice malfunzionamento del robot.

Anche un'eccessiva fiducia nelle capacità morali o sociali dei robot è pericolosa. La crescente tendenza delle persone ad antropomorfizzare i robot sociali e quella a stabilire con essi rapporti emotivi unilaterali può avere serie conseguenze sociali. Robot sociali apparentemente amabili e degni di fiducia potrebbero essere usati per manipolare la gente in modi che non sono mai stati possibili prima. Un'azienda, per esempio, potrebbe sfruttare la particolare relazione tra un robot e il suo proprietario per promuovere e vendere i propri prodotti.

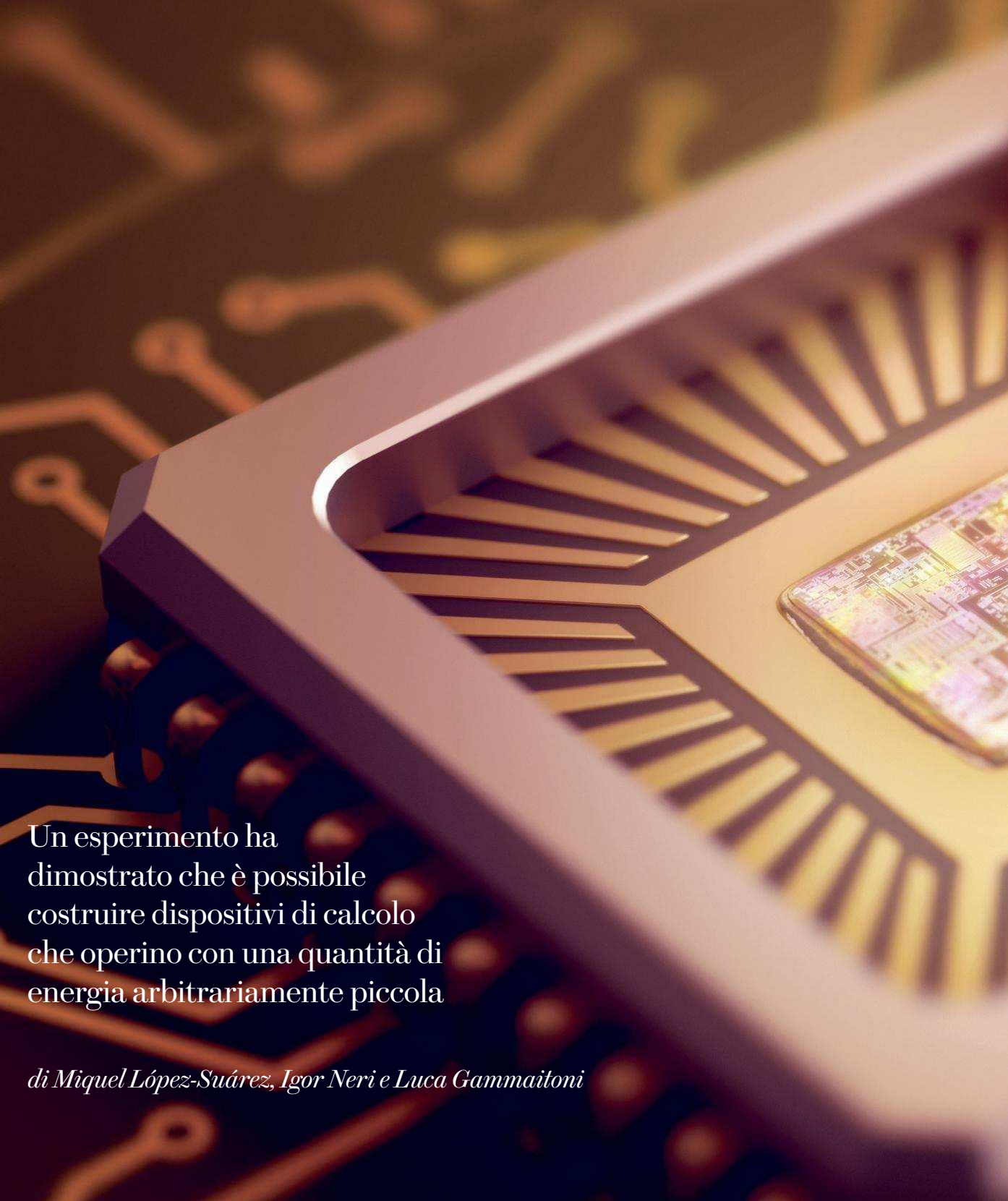
Per un prevedibile futuro, è indispensabile ricordare che i robot sono sofisticati strumenti meccanici, di cui deve assumersi la responsabilità un essere umano. Possono essere programmati per essere utili, ma per prevenire danni a persone, cose e ambiente i robot dovranno poter dire «no» a comandi che per essi risulti impossibile o pericoloso eseguire, o che violano norme etiche. E anche se la prospettiva che le tecnologie robotiche e l'intelligenza artificiale possano amplificare gli errori o le malefatte degli esseri umani è preoccupante, questi medesimi strumenti possono aiutarci a riconoscere e superare i nostri stessi limiti, e rendere la nostra vita quotidiana più sicura, più produttiva e più piacevole. ■

PER APPROFONDIRE

The Inherent Dangers of Unidirectional Emotional Bonds between Humans and Social Robots. Scheutz M., in *Robot Ethics: The Ethical and Social Implications of Robotics*, MIT Press, 2011.

Machine Ethics, the Frame Problem, and Theory of Mind. Briggs G., presentato al Congresso mondiale di AISB/IACAP 2012, Birmingham, 2-6 luglio 2012.

How Robots Can Affect Human Behavior: Investigating the Effects of Robotic Displays of Protest and Distress. Briggs G. e Scheutz M., in «International Journal of Social Robotics», Vol. 6, n. 3, pp. 343-355, agosto 2014.

«Sorry I Can't Do That»: Developing Mechanisms to Appropriately Reject Directives in Human-Robot Interactions. Briggs G. e Scheutz M., presentato al simposio *Artificial Intelligence and Human-Robot Interaction* della serie dei Simposi autunnali dell'AAAI, 2015, Arlington, Virginia, 12-14 novembre 2015.

Macchine che imparano. Bengio Y., in «Le Scienze» n. 576, agosto 2016.

Dobbiamo aver paura di robot troppo bravi? Russell S., in «Le Scienze» n. 576, agosto 2016.

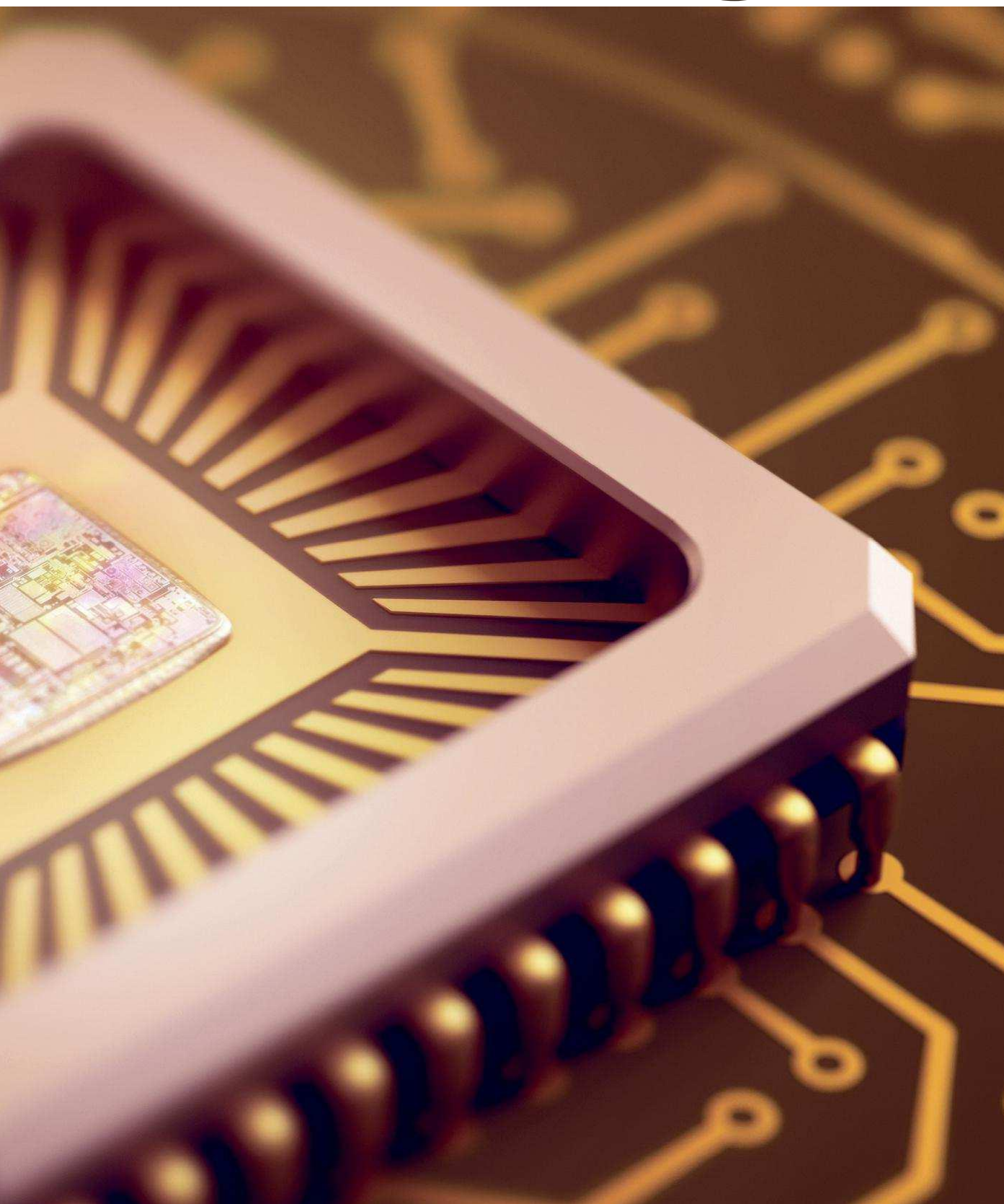
La verità sulle auto «che si guidano da sole». Shladover S.E., in «Le Scienze» n. 576, agosto 2016.

Verso computer

Un esperimento ha dimostrato che è possibile costruire dispositivi di calcolo che operino con una quantità di energia arbitrariamente piccola

di Miquel López-Suárez, Igor Neri e Luca Gammaitoni

a zero energia

Ktsdesign/SPL/Getty Images

Miquel López-Suárez è assegnista di ricerca presso il laboratorio Noise in Physical Systems (NiPS) dell'Università di Perugia.

Igor Neri è assegnista di ricerca presso il laboratorio Noise in Physical Systems (NiPS) dell'Università di Perugia.

Luca Gammaitoni è attualmente professore ordinario di fisica sperimentale all'Università di Perugia e direttore del laboratorio NiPS.

vete notato che la durata delle batterie dei telefoni cellulari è diminuita negli ultimi anni? Questo fenomeno è andato di pari passo con l'aumento delle funzioni e delle prestazioni di questi dispositivi. Da semplici terminali di telefonia sono diventati veri e propri centri multimediali che coprono funzioni tra loro molto diverse: dalla connessione al Web alla produzione di fotografie e filmati, dall'elaborazione di suoni e immagini al controllo delle nostre condizioni di salute o prestazioni sportive.

Questo spettacolare aumento di prestazioni è stato possibile grazie al crescente sviluppo tecnologico degli ultimi decenni, che ci ha fornito microprocessori sempre più veloci e sempre più complessi. Questi microprocessori costituiscono il cuore di ogni dispositivo elettronico e contengono un grande numero di transistor (attualmente oltre un miliardo per dispositivo), che per poter svolgere le operazioni di calcolo richiedono ciascuno una certa quantità di energia elettrica: attualmente i transistor più efficienti consumano circa 10^{-15} joule per operazione, dove 1 joule è l'energia che serve a sollevare da terra una mela per l'altezza di un metro. Maggiore il numero di transistor, maggiore la capacità di calcolo, maggiore il consumo dei dispositivi. Da qui la riduzione della durata delle batterie che devono fornire questa energia.

Progettisti e costruttori di microprocessori si trovano oggi davanti al difficile compito di aumentare la potenza di calcolo, il che significa aumentare numero e velocità di funzionamento dei transistor, cercando di non aumentare troppo l'energia consumata. La situazione è grave al punto che in *Rebooting the IT Revolution: A Call to Action*, l'ultimo rapporto presentato da Semiconductor Industry Association (SIA) e Semiconductor Research Corporation (SRC), nel 2015, si paventa che, continuando di questo passo, nel 2040 il consumo di elettricità dovuto all'uso dei computer supererà l'intera produzione mondiale di elettricità.

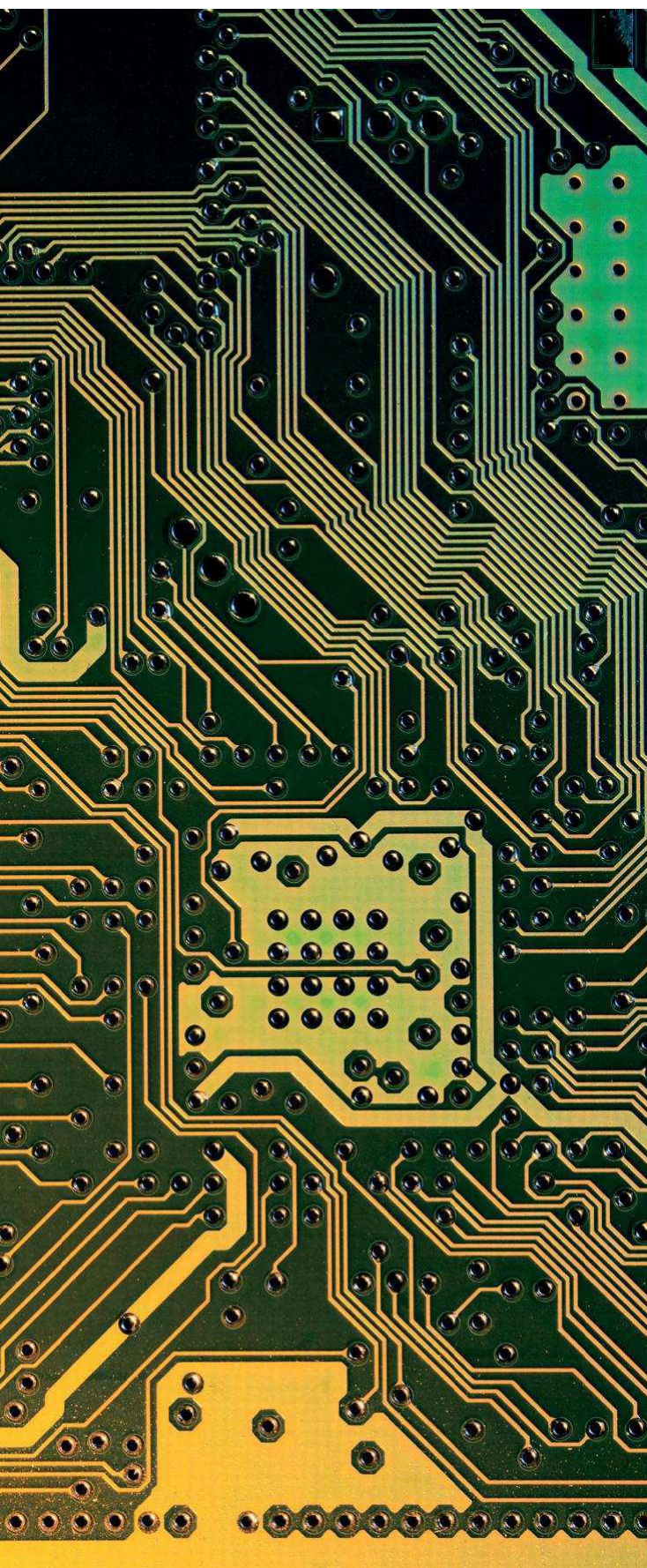
Negli ultimi quarant'anni sono stati fatti molti tentativi di successo mirati a ridurre il consumo energetico dei transistor, tuttavia sembra che per una serie di problemi sia tecnologici sia economici questa strada non sarà più percorribile a lungo. Per evitare il blocco della crescita nel settore, dovremo presto studiare nuovi modi per costruire computer che siano più efficienti dal punto di vista energetico.

IN BREVE

Lo sviluppo tecnologico degli ultimi decenni ci ha abituato all'idea di poter disporre di computer sempre più veloci e sempre più piccoli. Con l'aumento della potenza e la riduzione delle dimensioni sorge il problema dell'energia necessaria ad alimentare questi computer.

Sono stati fatti molti tentativi di successo per ridurre il consumo energetico delle macchine dedicate al calcolo. Ma qual è il limite teorico in termini di energia da spendere, per poter effettuare un qualsiasi calcolo?

Un esperimento degli autori ha dimostrato che l'assunto per cui gli attuali dispositivi di calcolo debbono per forza consumare una quantità minima di energia, conosciuto come principio di Landauer, è falso. I prototipi dell'esperimento non possono però sostituire l'attuale tecnologia dei microprocessori.

Mordolff/Getty Images

Come è possibile raggiungere questo obiettivo? Fino a quando potremo ridurre il consumo energetico di un microprocessore? Ovvero, esiste qualche limite teorico dovuto alle leggi fondamentali della natura che fissa il consumo minimo di un dispositivo di calcolo? È possibile immaginare la costruzione di un computer che possa funzionare consumando zero energia? Infine: avremo mai telefonini con batteria di durata illimitata?

Informazione fisica

Queste domande non sono nuove, e i ricercatori se le sono poste fin dagli albori della scienza dei computer. Le prime risposte si devono a importanti protagonisti dell'informatica come Claude Shannon, John Von Neuman, Rolf Landauer (conosciuto anche con il nome di Ralph).

In particolare, proprio a Landauer, fisico di origine europea, che lavorò lungamente alla IBM negli Stati Uniti, è attribuito un importante risultato oggi chiamato «principio di Landauer». Per capire questo principio dobbiamo ricordare che ogni computer è in ultima analisi una macchina, quindi un sistema fisico, e come tale deve ubbidire alle leggi della fisica. In materia energetica, le leggi che governano i fenomeni fisici sono quelle della termodinamica. Nel 1961, in un articolo pubblicato su «IBM Journal of Research and Development» e diventato celebre, Landauer aveva fatto notare che l'applicazione di queste leggi al funzionamento dei computer impone limiti sull'energia che un computer deve usare durante il suo funzionamento. In particolare, il secondo principio della termodinamica richiede che durante ogni trasformazione che provochi una diminuzione di entropia, ovvero una riduzione del numero di stati fisici possibili, si debba spendere una certa quantità minima di energia e che quindi non possa essere fatta a spesa energetica nulla.

Ma quand'è che siamo costretti a fare una trasformazione caratterizzata da una diminuzione di entropia? Per capire bene questo punto consideriamo un'operazione che i computer devono fare spesso durante le operazioni di calcolo: la scrittura di una cella di memoria. In un computer i dati sono rappresentanti mediante numeri binari: sequenze di «0» e «1». Questi numeri sono anche chiamati «bit» dalla contrazione delle parole *binary* e *digit*, ovvero cifre binarie. Per effettuare calcoli con numeri binari in un computer abbiamo bisogno di dispositivi fisici che possano assumere due diversi stati, per esempio «acceso» e «spento» oppure «aperto» e «chiuso». Questi dispositivi si chiamano interruttori binari (in inglese *binary switches*) e possono essere distinti in due grandi categorie: dispositivi combinatori (utili per effettuare calcoli veri e propri) e dispositivi sequenziali (utili per le memorie).

Un dispositivo combinatorio è un interruttore binario caratterizzato dal fatto che può cambiare il suo stato quando viene applicato un ingresso; una volta rimosso l'ingresso, l'interruttore binario torna allo stato iniziale. Pensate per esempio a una pallina su un piano, legata a una molla. Se applico una forza (l'ingresso del mio dispositivo), allora la molla si allunga e la pallina cambia posizione (l'uscita del mio dispositivo). Quando la forza viene rimossa, la pallina – grazie alla presenza della molla – ritorna nella posizione iniziale.

Un dispositivo sequenziale è simile a quello che abbiamo appena descritto, con la sola differenza che quando l'ingresso è rimosso allora non torna nello stato iniziale ma rimane nello stato in cui si trova (ecco perché è utile per le memorie). Come esempio possiamo immaginare la nostra pallina che si trovi in una scatola per uova con due alloggiamenti. Se applico una forza posso far

LA PORTA LOGICA «OR»

Dispositivi reversibili e irreversibili

Una porta logica «OR» è un dispositivo combinatorio che ammette due ingressi e un'uscita. Il valore dell'uscita può essere «0» o «1» a seconda del valore degli ingressi, indicati per esempio come A e B: se sono entrambi «0», l'uscita è «0». In tutti gli altri casi l'uscita è «1» (*si veda la tabella*).

Le porte logiche possono distinguersi in porte «logicamente reversibili» e porte «logicamente irreversibili». Il concetto di irreversibilità logica è stato introdotto da Rolf Landauer in un articolo del 1961: «Diremo che un dispositivo è logicamente irreversibile se l'uscita di questo dispositivo non è sufficiente a identificare in modo univoco gli ingressi.» Se guardiamo l'uscita della nostra porta logica «OR», è chiaro che quando è «0» possiamo identificare l'ingresso come dato dalla combinazione «0» + «0». Tuttavia quando l'uscita è «1» non possiamo dire con certezza quale tra queste combinazioni di ingressi sia responsabile: «1» + «1»; «0» + «1»; «1» + «0». Da qui la conclusione che la porta logica «OR» è un tipico dispositivo logicamente irreversibile.

Come ha mostrato Charles Bennet, collega di Landauer, si possono fare calcoli usando un altro tipo di porte logiche che siano logicamente reversibili, come quelle ideate dall'italiano Tommaso Toffoli nel 1980, quando era al Massachusetts Institute of Technology (MIT), e da Edward Friedkin, sempre del MIT, nel 1983. Con queste porte, caratterizzate da un numero di uscite non inferiore al numero degli ingressi, conoscendo i valori delle uscite è sempre possibile risalire al valore degli ingressi.

INGRESSO		USCITA
A	B	A OR B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

cambiare alloggiamento alla pallina. Una volta rimossa la forza la pallina rimane nell'alloggiamento in cui si trova.

Per memorizzare un bit di informazione dobbiamo usare un dispositivo sequenziale e generare una trasformazione del suo stato fisico. Ciò si realizza in pratica associando uno stato logico, ovvero un valore del bit, a ciascuno dei due suoi stati fisici: per esempio associamo lo stato logico «0» all'interruttore aperto e lo stato logico «1» all'interruttore chiuso. Un dispositivo sequenziale lasciato a sé stesso raggiunge quello che si chiama stato di equilibrio termodinamico, ovvero può essere con eguale probabilità sia nello stato «0» sia nello stato «1». Quando si vuole memorizzare un bit, supponiamo il bit «0», si deve applicare una forza che rompe lo stato di equilibrio termodinamico e lo fa andare con certezza nello stato logico «0».

Questo passaggio non è altro che una trasformazione fisica che comporta una riduzione dell'entropia, il sistema passa così da due possibili stati a uno. Per il secondo principio della termodinamica, a questo dimezzamento dell'entropia corrisponde un'inevitabile spesa minima di energia determinata per la prima volta dal fisico austriaco Ludwig Boltzmann all'inizio del secolo scorso. A temperatura ambiente questa spesa minima vale una quantità piccolissima di energia: circa un millesimo di miliardesimo di miliardesimo di joule.

Landauer effettuò la sua analisi sull'energia dei computer mentre era all'IBM all'inizio degli anni sessanta. A quell'epoca era già diventata popolare la nozione di «quantità di informazione», un concetto introdotto una quindicina di anni prima da Claude Shannon, ingegnere elettronico statunitense che lavorava alla Bell, la grande azienda di telefoni del Nord America. In base a questa nozione, una memoria che non è scritta (cioè è all'equilibrio termodinamico) è un dispositivo caratterizzato da due bit di informazione. Nel senso che può trovarsi tanto nello stato logico «0» quanto nello stato logico «1». Se scrivo la mia memoria, costringendola nello stato «0», per esempio, riduco la sua quantità di informazione. Ovvero dimezzo il numero degli stati in cui si può trovare: da due a uno. Come abbiamo visto prima, a questa operazione logica, una riduzione della quantità d'informazione, oggi nota come «reset di Landauer», corrisponde una trasformazione fisica che porta a una riduzione di entropia e quindi a una spesa energetica minima.

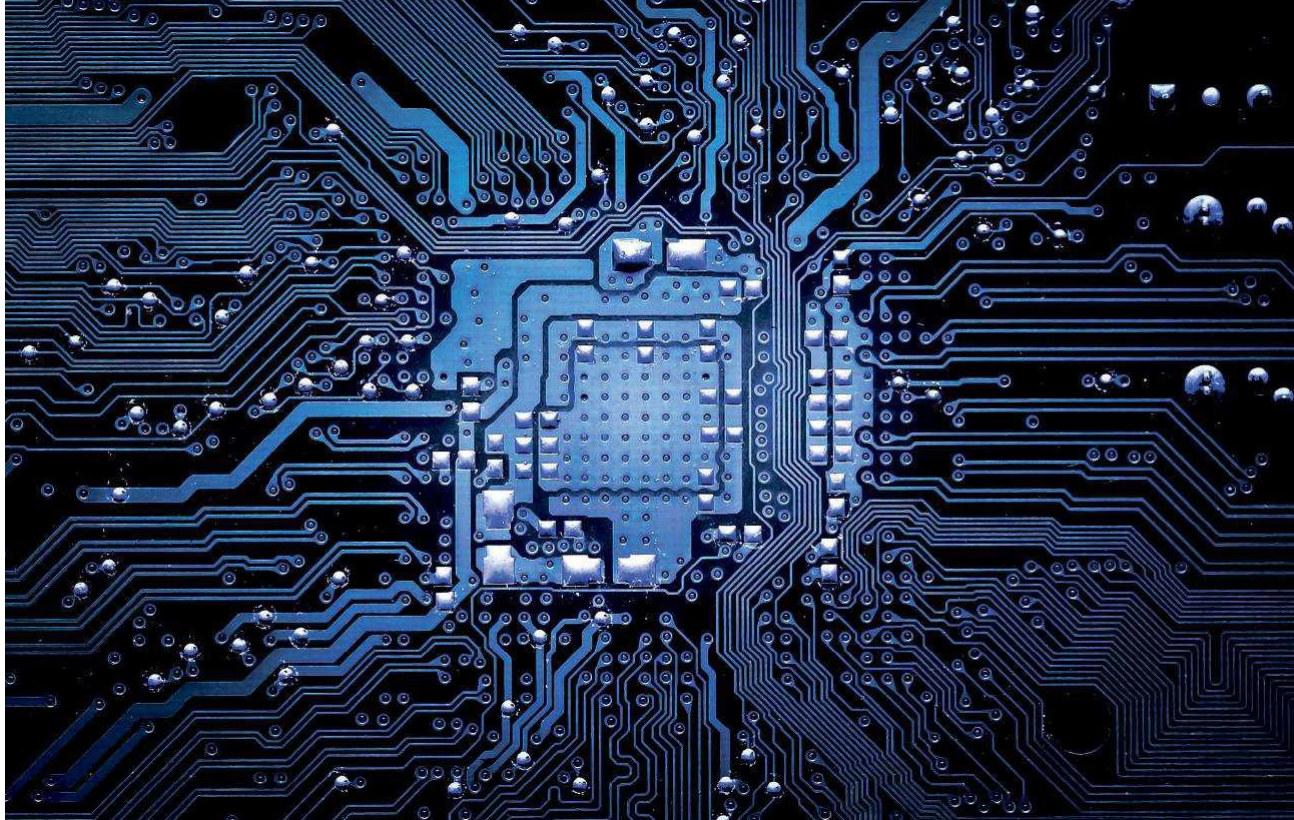
Da questo fenomeno Landauer ha tratto l'idea fondamentale alla base del principio che porta il suo nome: ogni volta che riduciamo la quantità di informazione in un dispositivo, questa operazione equivale a effettuare una corrispondente riduzione di entropia, e quindi necessita di una spesa energetica che non può essere zero. È in questo senso che deve essere interpretata la celebre frase di Landauer «*Information is physical*», l'informazione è una quantità fisica.

Una spesa minima

Questa idea di associare un ruolo fisico alla quantità di informazione, una grandezza considerata fino ad allora puramente matematica, è diventata molto popolare negli anni sessanta e settanta e ha generato un certo numero di interpretazioni diverse, non tutte pienamente condivise nella comunità degli scienziati.

Una delle interpretazioni più controverse è relativa a quale sia la quantità minima di energia per poter fare un calcolo. Per poter rispondere a questa domanda occorre definire con precisione che cosa si intenda per «fare un calcolo». In genere per poter svolgere i compiti assegnati a un computer abbiamo bisogno di entrambi i dispositivi che abbiamo introdotto in precedenza: dispositivi sequenziali e dispositivi combinatori. I primi sono usati per costruire memorie. I secondi invece sono usati per effettuare le operazioni di calcolo vero e proprio.

Queste operazioni di calcolo, che di solito individuiamo come le quattro operazioni aritmetiche (somma, sottrazione, moltiplicazione e divisione) nei computer si fanno usando numeri binari e possono essere realizzate combinando quelle che si chiamano porte logiche. Una porta logica è quindi un dispositivo combinatorio usato per il calcolo. Un semplice esempio è la porta logica «OR» (*si veda il box in questa pagina*) ed è una porta logicamente irreversibile. Il concetto di irreversibilità logica è stato intro-

dotto proprio da Landauer nel suo famoso articolo del 1961: «Diremo che un dispositivo è logicamente irreversibile se l'uscita di questo dispositivo non è sufficiente a identificare in modo univoco gli ingressi».

L'idea di Landauer sul consumo energetico del calcolo è molto semplice, ed è stata espressa in un articolo scritto per «Scientific American» nel 1985: ogni volta che usiamo queste porte «logicamente irreversibili», dissipiamo energia nell'ambiente (si veda *I limiti fisici fondamentali del calcolo*, in «Le Scienze» n. 205, settembre 1985).

Inizialmente Landauer pensava che per fare calcoli fosse indispensabile usare porte logiche irreversibili. In seguito, all'inizio degli anni settanta, il suo collega Charles Bennet dell'IBM mostrò che per fare calcoli è possibile usare anche un altro tipo di porte logiche, dette «porte reversibili». Nelle porte reversibili, conoscendo lo stato logico delle uscite si può sempre ricavare matematicamente lo stato logico di tutti gli ingressi (*si veda il box nella pagina a fronte*).

Quindi l'idea di Landauer, condivisa anche da Bennet, può essere riassunta così: data una qualunque porta logica, il suo funzionamento è necessariamente legato a una spesa energetica minima, misurata dal decremento della quantità di informazione che si trova all'uscita della porta logica rispetto a quella che si trova al suo ingresso. In questo senso Landauer tratta le porte logiche come aveva fatto con le memorie: decremento di informazione uguale spesa minima di energia.

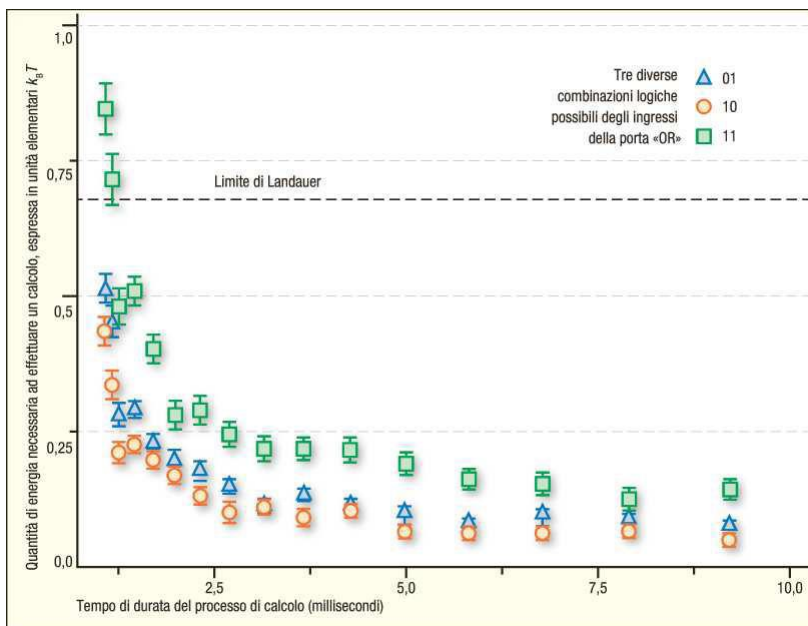
Nelle porte logiche reversibili di interesse pratico il numero delle uscite è uguale al numero degli ingressi, quindi questo decremento di informazione non c'è, e possono essere fatte funzionare senza spendere energia. Chiaramente non è questo il caso delle porte logiche come la «OR» che con due ingressi e un'uscita si trova ad avere un decremento di un bit di informazione. Per Landauer una porta «OR» non può essere fatta operare spendendo energia inferiore a una certa quantità, oggi nota come «limite di Landauer».

In sintesi possiamo dire che, grazie al lavoro di Landauer e Bennet, si è diffusa nella comunità scientifica l'idea che sia possibile fare un calcolo spendendo energia nulla solo usando porte logiche reversibili. Da questa convinzione è nata una branca della scienza dei computer che prende appunto il nome di «calcolo reversibile». Finora però questa disciplina ha trovato poche applicazioni, sia perché non ci sono molte realizzazioni pratiche di porte logiche reversibili sia perché i consumi energetici delle attuali porte logiche sono milioni di volte superiori al supposto limite di Landauer a causa di dissipazione e attrito di varia natura, e quindi passare a porte reversibili non cambierebbe in pratica la quantità di energia richiesta. Tuttavia, anche se la differenza dal punto di vista tecnologico al momento non sarebbe significativa, da un punto di vista della fisica fondamentale questo fa una grande differenza concettuale.

Come abbiamo accennato precedentemente, la quantità di energia minima da spendere per effettuare un calcolo con una porta logica irreversibile, il limite di Landauer, è molto piccola. Fino a qualche tempo fa non disponevamo delle tecnologie adatte a misurare queste minuscole quantità di energia, così la teoria di Landauer è rimasta per lungo tempo priva di verifiche sperimentali. Solo di recente alcuni laboratori in giro per il mondo hanno cominciato a condurre test diretti.

Nel 2012 Eric Lutz, allora all'Università di Augusta, in Germania, e Sergio Ciliberto, dell'Università di Lione, in Francia, con i loro colleghi, hanno testato l'operazione di «reset di Landauer» usando una piccola pallina in sospensione in un liquido, intrappolata con la luce. La quantità minima di energia da loro misurata durante la scrittura del bit di memoria, come mostrato su «Nature», è risultata in accordo con la previsione di Landauer. Due anni dopo John Bechhoefer e colleghi, della Simon Fraser University, in Canada, hanno ripetuto l'esperimento, confermando il risultato su «Physical Review Letters». Nonostante in questi anni siano stati condotti altri esperimenti legati agli aspetti di questa teoria, non è mai stata testata in modo diretto l'affermazione secondo cui non fosse possibile operare un dispositivo logicamente irreversibile spendendo un'energia arbitrariamente bassa.

Landauer messo alla prova

Al NiPS Lab dell'Università di Perugia abbiamo costruito un dispositivo combinatorio che può essere usato per effettuare le operazioni di una porta logica «OR» con l'obiettivo di testare la teoria di Landauer. Il dispositivo è costituito da una lamella di nitruro di silicio lunga circa 200 micrometri e spessa 500 nanometri, a forma di «V» capovolta, che può essere piegata mediante una forza elettrostatica esercitata da due punte metalliche vicine, a cui viene applicata una certa differenza di potenziale (*illustrazione a fronte*).
Questa lamella funziona come un interruttore binario e può essere usata per le operazioni di una porta logica «OR». Se non è applicata tensione elettrica alle punte, la lamella rimane nella posizione verticale. A questa posizione associamo lo stato logico «0». Se invece è applicata tensione a una o a entrambe le punte, la lamella si piega per forza elettrostatica e possiamo associare a questo «stato piegato» lo stato logico «1». Interpretando assenza o presenza di tensione nelle punte come valori di ingresso logico «0» e «1», possiamo verificare che questo dispositivo realizza le funzioni di una porta logica «OR» (*si veda il box a p. 56*).
Nella colonna di sinistra dell'illustrazione della pagina a fronte è mostrata la misurazione della posizione della punta nei tre casi d'interesse. Poiché la lamella è molto piccola, lo spostamento della punta in conseguenza del piegamento è anch'esso molto piccolo, e soggetto a fluttuazioni termiche. La posizione della punta si distribuisce statisticamente secondo la legge di Gauss, ed è centrata attorno al suo valor medio. Lo spostamento medio, in occasione dello stato degli ingressi «0» + «1» e «1» + «0» è simile, e in valore di poco inferiore a 1 nanometro, mentre quello corrispondente allo stato degli ingressi «1» + «1» si attesta attorno a 1,1 nanometri.
Nel grafico qui sopra sono riportate tre curve relative alla misurazione effettuata con le tre configurazioni di ingresso. Per ciascuna si nota che al crescere della durata del ciclo si ottiene un calo dell'energia dissipata. Questo fenomeno è associabile a fenomeni di attrito nel movimento della lamella. Più lentamente si procede, più si riducono le dissipazioni e ci si avvicina alla condizione di trasformazione adiabatica, in cui cioè non c'è uno scambio netto di calore con l'ambiente. Quasi tutte le misurazioni mostrano valori di energia usata inferiori a quello che la teoria di Landauer richiederebbe.

Testare il limite

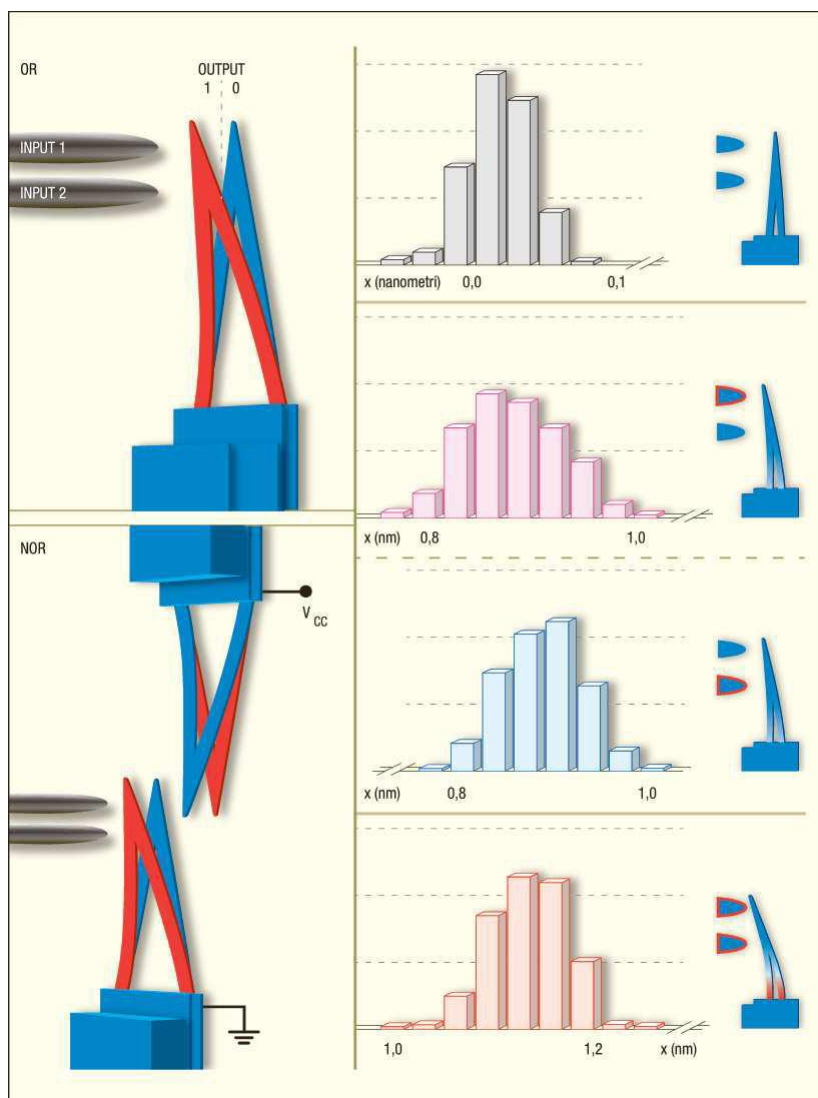
Circa cinque anni fa abbiamo proposto alla Commissione Europea di finanziare un progetto di ricerca finalizzato a studiare questi aspetti di calcolo «a zero energia». Il progetto, iniziato nel settembre 2012, ha visto la partecipazione di sei gruppi europei ed è stato coordinato dall'Università di Perugia. Non a caso il titolo del progetto è stato «LANDAUER». Dopo tre anni di lavoro abbiamo ottenuto interessanti risultati, che di recente sono stati pubblicati su prestigiose riviste internazionali. Uno dei più interessanti è stato proprio quello ottenuto durante il test sperimentale del principio di Landauer, applicato alle porte logiche irreversibili.

Al Laboratorio NiPS, presso il Dipartimento di fisica e geologia dell'Università di Perugia, abbiamo costruito una porta logica «OR», sfruttando la tecnologia micro-elettromeccanica (*si veda l'illustrazione a fronte*). La nostra porta realizzata con una piccola lamella sottoposta a forze elettrostatiche è un esempio di porta logica irreversibile: se ci concentriamo sulla combinazione di ingressi «0» + «1» e «1» + «0» possiamo riconoscere che dalla sola osservazione dello stato dell'uscita, rappresentato dalla posizione della punta, è impossibile indovinare se ci si trovi nell'una o nell'altra delle due configurazioni possibili. Questa condizione realizza il concetto di irreversibilità logica come evidenziato da Landauer.

Per poter sottoporre a test l'esistenza del limite di Landauer per porte logiche, abbiamo fatto un grande numero di misurazioni della quantità di lavoro effettuato dalle forze elettriche per piegare la lamella, in diverse condizioni del valore degli ingressi e anche a diverse velocità di trasformazione. Grazie a cicli ripetuti del test, abbiamo trovato che quasi tutte le misurazioni mostrano valori di energia usata inferiori a quello che la teoria di Landauer richiederebbe. Questi dati, pubblicati di recente su «Nature Communications», indicano che, contrariamente a quanto sostenuto dalla teoria di Landauer, è possibile operare porte logiche irreversibili spendendo energia arbitrariamente piccola.

Una questione di linguaggio

È presto per poter dire come verrà accolta questa scoperta dalla comunità scientifica internazionale. Tuttavia è certo che fin dagli esordi la teoria di Landauer si è caratterizzata come piuttosto controversa. Acclamata dagli ingeneri elettronici e dell'informazione, ha spesso trovato opposizione nel mondo della fisica statistica. A nostro avviso ciò è largamente dovuto a incomprensioni causate dall'uso di linguaggi diversi. Landauer assume un linguaggio che è proprio della teoria dell'informazione ma che male si adatta alla fisica. Parla di «ingresso» e «uscita» di un dispositivo di cal-

Danilo Sossi (*su indicazione degli autori*)

Misure di porte. Nella colonna a sinistra: in alto, schema di funzionamento della porta logica «OR» basata su una lamella microelettromeccanica. In basso: funzionamento di una porta «NOR», ottenuta dalla combinazione di due lamelle. Nella colonna a destra: misurazione dello spostamento della punta per tre diverse combinazioni dello stato degli ingressi.

Danilo Sossi (*su indicazione degli autori*)

colo e associa a queste «due parti del sistema» un certo quantitativo di informazione.

Ora, se guardiamo ai dispositivi di calcolo ci accorgiamo che il ruolo degli ingressi può essere assegnato alle forze che agiscono *sul* sistema, mentre il ruolo dell'uscita è rappresentato dallo stato *del* sistema. In questo senso gli ingressi sono semplicemente la causa della variazione dello stato del sistema ma non contano ai fini del calcolo della variazione dell'entropia perché non sono parte del sistema fisico che subisce la trasformazione.

Nella visione di Landauer quello che conta è la differenza di quantità d'informazione tra ingresso e uscita, interpretata come variazione di entropia. La visione termodinamica ragiona invece sulla trasformazione da uno stato iniziale a uno stato finale. Per la termodinamica conta solo la variazione di entropia tra questi due stati. O meglio, conta solo la variazione di entropia quando lo stato del sistema cambia nel tempo, sotto l'azione della forza. Quindi, se si riesce a eseguire una trasformazione tra stato iniziale e stato finale in cui l'entropia rimane costante, per le leggi della fisica questa può essere realizzata a costo zero, indipendentemente da quanti bit erano presenti all'ingresso, ovvero indipendentemente da quante forze indipendenti agivano sul sistema.

Se i risultati del nostro esperimento saranno confermati anche da altri esperimenti indipendenti, allora occorrerà rivedere profondamente la fisica del calcolo, e la teoria di Landauer, come molte altre nella storia, dovrà essere aggiornata alla luce di nuove prove sperimentali.

Ritorno al passato

La mancanza di un limite minimo all'energia necessaria per poter operare una porta logica irreversibile apre la strada alla realizzazione di microprocessori di nuova generazione che non siano più limitati da una ben definita quantità minima di calore da dissipare. Per mostrare che questa è una strada percorribile, nel nostro laboratorio abbiamo anche realizzato una porta logica universale NOR. Combinando insieme più porte NOR, è possibile eseguire tutte le operazioni logiche e aritmetiche tipiche di un microprocessore.

Il prossimo passo sarà far funzionare un dispositivo per il calcolo della somma di due numeri binari, chiamato *full adder* (sommatore completo). Abbiamo già progettato la configurazione di lamelle che ci permetterà di costruire un full adder e di misurarne il consumo energetico durante il funzionamento.

Chiaramente siamo coscienti che questi nostri prototipi micro-elettromeccanici non possono costituire di per sé una valida alternativa ai circuiti CMOS (acronimo di Complementary Metal-Oxide Semiconductor) che sono attualmente impiegati nei microprocessori: sebbene milioni di volte più efficienti come consumo energetico, i nostri prototipi sono troppo lenti e troppo ingombranti. Tuttavia indicano una strada che potrebbe portare i computer di domani ad abbandonare la tecnologia microelettronica su cui sono basati i transistor per abbracciare dispositivi nanomeccanici. Una sorta di ritorno al passato, quando le calcolatrici funzionavano con ingranaggi azionati a manovella. Il futuro dei sistemi di calcolo si prospetta imprevedibile e interessante: siamo tutti chiamati a immaginare nuovi telefonini con batterie di durata... potenzialmente illimitata. ■

PER APPROFONDIRE

Sub-kBT Micro-Electromechanical Irreversible Logic Gates. López-Suárez M., Neri I. e Gammaitoni L., in «Nature Communications», Vol. 7, articolo n. 12068, pubblicato on line il 28 giugno 2016.

Exploring the Thermodynamic Limits of Computation in Integrated Systems: Magnetic Memory, Nanomagnetic Logic, and the Landauer Limit. Lambson B., Carlton D. e Bokor J., in «Physical Review Letters», Vol. 107, p. 010604, 1 luglio 2011.

I limiti fisici fondamentali del calcolo. Bennet C.H. e Landauer R., in «Le Scienze» n. 205, settembre 1985.

Tracie Ching

Richard Schiffman è un giornalista di New York
che si occupa di ambiente.

DOMANDE E RISPOSTE

Richard Leakey, già paleontologo e oggi uomo politico, guida la lotta del governo del Kenya contro il bracconaggio

di Richard Schiffman

Il 30 aprile 2016 il presidente del Kenya Uhuru Kenyatta ha appiccato il fuoco alla pila di avorio d'elefante e corni di rinoceronte confiscati dalle autorità del paese africano. È stato il più imponente evento di questo tipo mai avvenuto: sono state incenerite 105 tonnellate di avorio, per un valore di circa 100 milioni di dollari, e 1,3 tonnellate di corni, per un valore di 67 milioni di dollari. In un certo senso, quel falò era un funerale per gli oltre 6000 elefanti e 300 rinoceronti uccisi dai bracconieri a scopo di contrabbando e, cosa ancora più importante, era un segnale di fumo per trasmettere il messaggio che questi materiali sono privi di valore se vengono tolti agli animali, che attraggono turisti e svolgono un ruolo chiave nel mantenimento di un ecosistema equilibrato.

Zanna dopo zanna, corno dopo corno, l'Africa sta perdendo la sua popolare fauna selvatica: il numero di elefanti africani è crollato del 62 per cento solo nell'ultimo decennio, principalmente a causa del bracconaggio, e oggi si contano solo 29.000 rinoceronti, mentre nel 1970 ce n'erano 70.000. E non sono certo queste le uniche vittime: il numero di leoni è diminuito del 43 per cento negli ultimi vent'anni; il numero di giraffe è sceso da 140.000 nel 1999 a sole 80.000 oggi; e la lista potrebbe continuare.

Per arginare la distruzione, nell'aprile del 2015 Kenyatta ha nominato Richard Leakey presidente del Kenya Wildlife Service (KWS). Per Leakey non è il primo contatto con il servizio per la protezione ambientale, dato che nel 1989, quando il KWS era agli albori, ne era stato nominato direttore. Fino a quel momento era più noto come scopritore di fossili umani, ma presto conquistò una reputazione di funzionario statale incorruttibile e intransigente. Si dimise dalla posizione nel 1994, denunciando la corruzione serpeggiante tra i pubblici ufficiali del governo del presidente Daniel arap Moi.

Adesso la posta in gioco per la conservazione è perfino più elevata. Elefanti, rinoceronti e altre specie devono affrontare una caccia di frodo più intensa che mai da parte di bande criminali organizzate che cercano così di soddisfare la domanda di prodotti di fauna selvatica sul fiorente mercato asiatico.

«Scientific American» ha intervistato Leakey, oggi settantaduenne, presso la Stony Brook University a Long Island, dove è presidente del Turkana Basin Institute, per parlare della sua attività per la conservazione del patrimonio naturalistico kenyano. L'intervista è stata adattata per maggiore chiarezza.

La redazione

Perché l'erede di una famosa famiglia di paleontologi ha cominciato a dedicarsi alla conservazione ambientale?

Quando studiavo i fossili mi occupavo di specie che si estinsero a causa di cambiamenti climatici o una predazione eccessiva. Oggi, guardando i magnifici paesaggi kenyani popolati dai loro successori, i sopravvissuti, che adesso sono specie completamente diverse, per me è un'esperienza molto forte. Tra loro mi sento a casa, riesco a capire meglio me stesso, percepisco la mia posizione nel grande flusso della vita. Perciò la paleontologia non è separata dalla mia attenzione per la natura, ne è una parte intrinseca.

Come direttore del Kenya Wildlife Service dal 1989 al 1994, lei diventò famoso per aver preso misure severe contro la corruzione nel servizio ambientale e per aver dotato di armi i custodi dei parchi naturali, allo scopo di combattere un'ondata di bracconaggio di avorio che imperversava in Kenya all'epoca.

Era necessario colpire il mercato, e la mia idea fu di distruggere l'avorio confiscato in grandi falò. Questo produsse un'enorme pubblicità sul fatto che gli elefanti erano uccisi per le loro zanne, che portò il CITES (Convenzione sul commercio internazionale delle specie minacciate di estinzione) a imporre un divieto internazionale sulle vendite di avorio. Quel divieto ebbe un impatto enorme: il numero di elefanti uccisi in Kenya diminuì da migliaia l'anno a circa 100 alla fine degli anni novanta e rimase a quel livello per circa un decennio.

Che cosa è accaduto per riportare il livello di bracconaggio ai livelli disastrosi che ci sono oggi in buona parte dell'Africa?

Quando il livello di uccisioni illegali diminuì, c'erano ancora grandi scorte di avorio conservate nei magazzini e alcune nazioni (in particolare il Sudafrica, ma anche Botswana, Namibia e Zimbabwe) pensarono che venderle avrebbe fruttato bene, perciò persuasero il CITES a dare loro l'autorizzazione a immettere l'avorio sul mercato. Qui in Kenya capimmo subito che una volta che il commercio di avorio fosse ripartito sarebbe stato molto difficile distinguere tra un permesso di esportazione valido e uno falso. Insomma, presto l'avorio fu nuovamente prelevato di frodo ed esportato con documenti falsificati. Il prezzo salì drasticamente, e grandi associazioni criminali cominciarono a interessarsi alla cosa. Fu una situazione deplorevole.

In fiamme: Una guardia forestale guarda il falò di zanne d'elefante confiscate che bruciano nel Parco Nazionale di Nairobi il 30 aprile 2016.

Foto di Tracie Ching

Per aiutare a gestire questa crisi, l'anno scorso lei è stato nuovamente invitato a presiedere il KWS. Perché ha accettato?

Il presidente ha promesso che io e il consiglio direttivo avremmo avuto mano libera nel prendere decisioni senza interferenze politiche di funzionari corrotti. Quando ho assunto l'incarico, nel servizio di protezione ambientale il morale era infimo. Ora stiamo iniziando a vedere le persone giuste che fanno le cose giuste, perché si sentono al sicuro e sanno che non ci saranno intromissioni. Negli ultimi 11 esi il Kenya ha perso 94 elefanti, contro le diverse centinaia morti nello stesso periodo l'anno scorso. Abbiamo aggiornato la legge kenyana sulla flora e la fauna selvatiche per snellire la gestione dei servizi di protezione ambientale, assumere 1000 guardie forestali aggiuntive e inasprire le pene per il bracconaggio. Attualmente stiamo assumendo e addestrando un corpo di magistrati speciali per la protezione naturalistica. Stiamo dotando i nostri dipendenti di nuove vetture, sistemando le strade e fornendo ai nostri collaboratori alloggi decorosi nelle aree rurali, servizi sanitari e nuove attrezzature per combattere il bracconaggio.

Per proteggere la natura serve il consenso delle comunità locali: come le state coinvolgendo?

Negli ultimi decenni, «National Geographic», BBC, tutti questi grandi gruppi di comunicazione hanno prodotto documentari sulla natura africana per il pubblico estero. Nessuno di questi film è mai stato trasmesso in Kenya. WildlifeDirect, un'organizzazione di beneficenza fondata da me, ha convinto alcune case cinematografiche a darci gratuitamente questi documentari, che dal gennaio 2016 sono andati in onda ogni sabato alle 20.00. Ogni volta che sono trasmessi diventano l'argomento principale di discussione nei *social media* kenyani. WildlifeDirect produce anche NTV Wild Talk, che va in onda il martedì sera: sono i primi film realizzati da africani sulla flora e la fauna locali. Presto la popolazione del Kenya amerà questi animali come li amano a Londra, Parigi e New York.

Di solito le riserve naturalistiche si giustificano con il fatto che portano introiti turistici. Che ne pensa il KWS?

I kenyani si stanno rendendo conto che bisogna cambiare completamente mentalità a proposito della flora e della fauna selvatiche. Oggi il turismo è un fattore importante per il nostro futuro economico, ma è comunque molto incostante, e nel migliore dei casi è un aiuto a medio termine, perché con lo sviluppo del paese a un certo punto prenderà piede l'industria. D'altra parte molte persone stanno cominciando a rendersi conto che ogni nazione ha bisogno di spazi dove poter respirare a pieni polmoni e godere le bellezze naturali. I kenyani considerano tutto ciò come il loro inestimabile patrimonio nazionale, e sul lungo periodo è molto più importante del turismo.

Come risolvere la situazione degli abitanti dei villaggi rurali che vivono pericolosamente vicini agli animali selvatici?

La popolazione del Kenya è triplicata e la gente si trasferisce sempre di più in aree dove vivono gli animali. Molte persone vengono uccise da elefanti, bufali, coccodrilli; le messi sono distrutte e ci sono

tensioni e risentimenti tra uomini e animali. Credo fermamente che sia necessario recintare i parchi nazionali in modo che gli animali non possano entrare nelle fattorie e le capre e le mandrie degli allevatori non possano entrare nei parchi.

È una proposta molto drastica.

È vero, ma potrebbe essere l'unica soluzione efficace. La tecnologia per costruire le recinzioni è efficiente ma costosa: chiederemo a istituzioni internazionali come la Banca Mondiale prestiti agevolati con tassi d'interesse ridotti che potranno essere saldati ratealmente su un periodo di trent'anni. Grazie alle recinzioni sarà più facile tenere a freno il problema del bracconaggio, dato che le mandrie degli allevatori che vagano nei parchi sono spesso usate come copertura da cacciatori di frodo che si fingono mandriani. Ci vorranno dai tre ai cinque anni, ma quando l'opera sarà conclusa la gente dirà: «Ben fatto!». Adesso dicono: «Siete matti».

Oggi in Kenya gli abitanti delle aree rurali non stanno ricevendo un ritorno economico dal turismo; in Namibia e Botswana le riserve naturali gestite dalle comunità hanno ottenuto il sostegno delle popolazioni locali. Non c'è bisogno di coinvolgere il kenyano medio nella protezione della natura?

Naturalmente. È vero che dobbiamo ottenere l'aiuto della gente, ma vogliamo farlo proprio puntando a una rapida crescita del turismo, così chi vive attorno ai parchi riceve gratificazioni economiche e può mandare i figli a scuola, e poi quando il turismo declina questi ragazzi sono forzati ad abbandonare il percorso scolastico? Secondo me gli introiti derivati dal turismo dovrebbero andare al governo centrale ed essere usati per costruire ospedali più efficienti, strade e infrastrutture per l'intera nazione, non solo per rabberciare temporaneamente le condizioni di coloro che si trovano a vivere vicino a un parco.

Non sente una contraddizione nell'usare denaro pubblico per proteggere l'ambiente naturale quando vi sono così tanti kenyani che vivono in povertà?

Quando ero segretario del Consiglio dei ministri del Kenya, ogni voce in bilancio per l'intera burocrazia governativa passava sulla mia scrivania e molti ex colleghi di quando lavoravo per la protezione ambientale mi dicevano: «Non potresti aggiungere qualcosina al nostro budget? Ci aiuterebbe molto». E dovevo rispondere: «Eticamente, no. Quando ci sono così tante persone i cui figli non vanno a scuola, non sono vaccinati, sono senza acqua, perfino senza tetto, non posso togliere loro del denaro per darlo ai servizi di protezione ambientale». Sono stati due anni molto duri per me.

E ora è nuovamente dall'altra parte della barricata.

Già, ma riconosco quanto sia importante aiutare le persone. Se non si affronta il problema della povertà non c'è sicurezza per nessuno nella nostra società, non c'è sicurezza istituzionale, non c'è sicurezza nazionale e certamente non c'è sicurezza per l'ambiente e le specie selvatiche. I parchi nazionali sono stati istituiti per il bene di tutti. Il denaro che generano dovrebbe essere usato per aiutare tutti i kenyani a raggiungere un'istruzione migliore, avere strade e infrastrutture migliori e vivere più a lungo e in migliore salute.

Mombasa, la seconda città del Kenya, è forse il porto principale dell'Africa orientale per l'esportazione in Asia di avorio illegale. Che cosa sta facendo il governo kenyano per mettere sotto controllo questa situazione?

Oggi la maggior parte dell'avorio che transita a Mombasa non proviene dal Kenya, ma dalla Tanzania, dall'Africa centrale. Il primo obiettivo che mi sono dato è stato fermare l'uccisione degli elefanti kenyani, e lo abbiamo raggiunto. Eliminare il contrabbando non è alla portata del KWS, e rimane un'attività in corso. Recentemente le autorità portuali di Mombasa hanno rinnovato il loro personale da cima a fondo. Hanno una squadra doganiera completamente nuova, un nuovo reparto per la gestione dei container e uno nuovo anche sulle banchine. Finora sembra stia funzionando bene.

Nella vicina Tanzania è stato presentato un progetto per la costruzione di un'autostrada nella pianura del Serengeti, e diversi ambientalisti sostengono che provocherebbe la fine della più grande migrazione di animali al mondo. Lei invece è favorevole al progetto.

Il Serengeti è un ecosistema meraviglioso, che dovrebbe essere protetto a ogni costo, ma bisogna affrontare il problema pragmaticamente. Il Serengeti è circondato da comunità in espansione e si prevede che le città che quella strada andrebbe a servire crescano fino a diventare una metropoli da oltre 3 milioni di abitanti. Nel prossimo decennio la Tanzania costruirà un secondo porto e, come fa anche il Kenya, punta chiaramente alle trattative commerciali con l'Africa centrale. Perciò quella strada è necessaria, e sì, sono a favore di un corridoio di trasporto che attraversi il Serengeti. Ma 40 chilometri dell'autostrada in questione dovrebbero essere sopraelevati di 30 metri rispetto al livello del suolo, in modo da permettere alla fauna di muoversi avanti e indietro a piacimento.

Qual è la sua preoccupazione più seria?

I cambiamenti climatici. Sono semplicemente terrificanti. Il mio forte timore è che, a causa della crescita demografica e dello sviluppo incontrollato intorno ai parchi, abbiamo creato «isole» per la flora e la fauna selvatica. E se guardiamo alla documentazione paleontologica, dove ci furono isole e avvennero cambiamenti climatici, le specie insulari si estinsero molto prima di quelle sulla piattaforma continentale, perché non avevano dove fuggire. Se ci fosse una siccità e i pozzi del parco seccassero, non ci sarebbe alcun luogo dove andare. Non so come risolveremo in futuro il problema della mancanza d'acqua e delle ridotte precipitazioni.

Brad Pitt interpreterà il suo ruolo in un film che racconta la sua storia. Che cosa ne pensa?

Ho sempre desiderato un film che potesse denunciare la pessima situazione in cui si trovano elefanti e rinoceronti. Se Brad Pitt si fa vedere mentre lotta per salvare questi animali, gli crederanno decine di milioni di persone, anche in Cina.

Insomma, Brad Pitt che recita la parte di Richard Leakey potrebbe essere una voce più potente del Richard Leakey vero.

Mille volte più potente! ■

PER APPROFONDIRE

Wildlife Wars: My Fight to Save Africa's Natural Treasures, Leakey R. e Morell V., St. Martin's Press, 2001.

Wildlife Protection and Trafficking Assessment in Kenya: Drivers and Trends of Transnational Wildlife Crime in Kenya and Its Role as a Transit Point for Trafficked Species in East Africa, Weru S., in «Traffic Report», maggio 2016.

Sulle rotte dell'avorio, Wasser S.K., Clark B. e Laurie C., in «Le Scienze» n. 493, settembre 2009.

Honey, ferita dalla pallottola di un uomo che aveva aggredito la sua padrona, forse le ha salvato la vita.

SCIENZE FORENSI

Animali sulla scena del crimine

I progressi della medicina veterinaria forense contribuiscono a far scoprire e condannare chi maltratta gli animali

di Jason Byrd e Natasha Whitling

Nelle ore più buie del 23 agosto 2015 – mentre tanti newyorkesi erano immersi nel sonno – Asha Stringfield difendeva la propria vita contro un uomo deciso a brutalizzarla. L'aggressore, un suo ex fidanzato, aveva già commesso abusi contro la giovane in passato ed era stato diffidato dall'avvicinarla. Stando ai verbali del processo, mentre Asha riposava a letto l'uomo l'aveva aggredita con pugni alla testa e al volto, cercando poi di strangolarla. In quello che avrebbe potuto essere il suo ultimo atto, l'ha presa per i capelli, strappandola dal letto, le ha puntato un'arma alla testa e le ha intimato di dargli «due ragioni» per non spararle. È stato allora, in quel momento di terrore e caos, che Honey, la cagnolina della donna, una pitbull di sangue misto bianca e marrone dell'età di un anno, si è messa tra Asha e il suo assalitore. La donna ha rifiutato di lasciarla andare, e, atterrita, ha visto il suo aggressore ficcare la canna in bocca a Honey e premere il grilletto. Lo sparo ha svegliato i vicini, qualcuno ha chiamato la polizia e l'aggressore è fuggito.

Fotografia di Grant Delin

La chiamata è stata raccolta dagli agenti del Dipartimento di polizia di New York (NYPD), che hanno portato Asha in un ospedale della zona e Honey – ancora viva ma sanguinante dalla bocca – a un pronto soccorso veterinario. Qui i raggi X hanno rivelato che la pallottola aveva attraversato la parte dorsale della bocca del cane per poi annidarsi alla base del cranio.

Una volta stabilizzate le sue condizioni, i veterinari l'hanno trasferita all'Ospedale per animali dell'American Society for the Prevention of Cruelty to Animals (ASPCA). Alison Liu, una veterinaria specializzata nella raccolta di prove utili per le indagini, ha esaminato a fondo Honey e le sue lesioni, prelevandole anche sangue per gli esami di laboratorio con cui verificare aspetti come infiammazione tissutale e danni muscolari. Ha effettuato varie radiografie del cranio e del corpo, esaminato il foro di entrata nella bocca del cane, documentandone fotograficamente le condizioni.

In seguito Liu è riuscita a identificare con precisione la posizione della pallottola. Questi elementi di prova, insieme alla sua competenza in medicina veterinaria, hanno avuto un ruolo essenziale nel portare l'accusato a rispondere di una serie di reati e infrazioni per le lesioni inflitte all'animale, oltre ai molteplici capi d'accusa per l'aggressione alla donna. Nel 2016 l'uomo si è dichiarato colpevole ed è stato condannato a cinque anni di carcere, più 13 anni di libertà vigilata. Honey è tornata a casa da Asha, ma con una pallottola in corpo a ricordo di quella notte di violenza, perché probabilmente l'intervento per rimuoverla le sarebbe stato fatale.

Nell'ultimo decennio, dipartimenti di polizia e magistrati inquirenti hanno messo meglio a fuoco i problemi legati alle indagini sui reati di crudeltà verso gli animali. Alcuni casi di alto profilo, come l'operazione «Bad Newz Kennels» del 2007 contro un giocatore della National Football League, Michael Vick, accusato con vari complici per un giro di combattimenti illegali di cani, hanno contribuito a puntare i riflettori sui crimini sugli animali. Nel gennaio 2014 il NYPD ha lanciato un'apposita collaborazione con l'ASPCA, con cui ha posto la lotta ai crimini contro gli animali fra le massime priorità, annunciando la costituzione di una nuova unità specializzata, la Animal Cruelty Investigation Squad. Nell'ottobre 2014 l'FBI ha annunciato che dal 2016 avrebbe cominciato a tenere traccia dei reati di crudeltà contro animali inserendoli nel Gruppo A, accanto ad altri crimini gravi come omicidi, incendi dolosi e aggressioni.

Ovviamente, fare male agli animali è orribile, ma se oggi questi casi sono sempre più seguiti dagli inquirenti è perché, detto brutalmente, chi sevizia gli animali spesso nuoce anche alle persone. La violenza contro gli animali è spesso un segno premonitore di quella contro gli esseri umani. Catturare chi sevizia gli animali può contribuire a prevenire futuri abusi contro le persone e molte volte può portare alla luce abusi anche contro minori e anziani.

I casi che riguardano reati contro gli animali sono in aumento. In larga misura, ciò avviene perché aumenta il numero dei veterinari coinvolti nelle indagini criminologiche, e migliorano le conoscenze scientifiche a sostegno. Negli Stati Uniti, inoltre, aumentano i corsi di giurisprudenza animale. «La squadra specializzata in medicina veterinaria forense mi ha aiutato a vincere tutti i miei grossi processi relativi ad animali», dice Michelle Welch, pubblica accusatrice e assistente del procuratore generale della Virginia, che nel gennaio 2015 è stata selezionata per dirigere la prima unità di magistrati specializzati in reati contro gli animali mai costituita negli Stati Uniti a livello di Stato. In 15 anni Welch ha trattato oltre 100 casi di crudeltà contro gli animali, e ha imparato a valersi dei contributi degli esperti per ottenere giustizia. In un recente caso di combattimenti di galli, per esempio, ha chiamato a testimoniare un esperto perché informasse il giudice sul dolore provato da questi animali per le lesioni inflitte dai ramponi metallici applicati ai loro speroni nei combattimenti. La corte ha dato grande peso alla testimonianza, e ha comminato una significativa pena detentiva.

Provare in modo convincente gli abusi sugli animali è difficile. Intanto, le tecniche usate per analizzare la scena del crimine con-

Jason Byrd è direttore associato del William R. Maples Center for Forensic Medicine e responsabile didattico del Veterinary Forensic Sciences Program dell'ASPCA (American Society for the Prevention of Cruelty to Animals) all'Università della Florida.

Natasha Whitling è dirigente del settore comunicazione dell'ASPCA.

L'analisi dei frammenti della pallottola (*macchie bianche*) rimasti alla base del cranio di Honey (*1*) ha contribuito a portare in tribunale un newyorkese per rispondere all'accusa di aver sparato al cane nel corso di un'aggressione alla sua proprietaria, Asha Stringfield (*2*).

IN BREVE

Specialisti di medicina veterinaria forense stanno migliorando le tecniche di indagine sui crimini contro gli animali, consentendo agli inquirenti di perseguire con più forza questi reati.

Le indagini scientifiche nei reati contro gli animali possono essere molto diverse rispetto a quelle in cui le vittime sono esseri umani. Il pelo può oscurare certi indizi, le vittime possono involontariamente distruggere le prove e le code confondono le tracce ematiche.

Negli Stati Uniti, solo un'università offre una gamma completa di corsi in questo campo. Preparare altri esperti e diffonderne le conoscenze tra agenti di polizia e altri operatori servirà a reprimere meglio questi reati.

2

tro gli esseri umani e determinare come è stata uccisa una persona non sempre valgono per gli animali. Anatomia e fisiologia delle vittime sono diverse da quelle umane, e possono variare enormemente da un animale all'altro. La pelliccia complica la valutazione dei traumi contusivi, per esempio, e la coda può disperdere e confondere le tracce ematiche. Ovviamente le vittime non possono parlare con gli investigatori, quindi tocca al veterinario forense capire il linguaggio corporeo degli animali e i loro segni non verbali di dolore o sofferenza. «In alcune aree chiave non c'è corrispondenza tra vittime umane e animali», dice Rachel Touroo, direttrice dell'ASPCA per la medicina veterinaria forense, che ha testimoniato nel caso dei combattimenti di galli istruito da Welch e in diversi altri. Ed è un lavoro molto diverso anche da quello dei laboratori per la protezione della fauna selvatica, che si concentrano soprattutto su bracconaggio e caccia e pesca illecite.

E ottenere una condanna è complicato. Oltre a descrivere scena dal crimine e indiziati, gli esperti possono dover dare spiegazioni su razze, comportamenti e malattie degli animali, sul loro stato di denutrizione e sul momento della morte o della lesione, nonché sulle interazioni tra un animale e l'altro. Ma le tecniche usate in parecchi recenti casi di alto profilo mostrano che, malgrado le imperfezioni, il miglioramento delle indagini scientifiche e della preparazione di chi le svolge sta portando a una repressione più efficace.

CSI, Georgia

Un caso insolito avvenuto in Georgia mostra quanto possono essere diverse le indagini sulla scena di un crimine quando le vittime sono animali e non esseri umani, ed esemplifica le tecniche che si possono applicare.

Fotografia di Grant Delin

Quando si tratta di animali, le indagini sono molto particolari: la pelliccia rende difficile valutare i traumi contusivi, la coda può confondere le tracce ematiche e le vittime non possono raccontare agli investigatori che cosa è successo

In una gelida mattina di febbraio del 2010, alcuni esperti di United Animal Nation, del Sumter Disaster Animal Response Team e dell'ASPCA raggiunsero gli agenti dell'Ufficio dello sceriffo della Contea di Washington su una strada rurale nei pressi di Sandersville, circa 200 chilometri a sud-est di Atlanta.

Percorso un breve tratto a piedi su una stradina bianca ingombra di densa vegetazione, davanti a loro si aprì un campo aperto con un pendio boscoso, e una scena desolante. Sparsi qua e là nella radura, alcuni pitbull fissavano gli agenti. Qualcuno, malgrado le pesanti catene fissate a terra, pareva voler accogliere festosamente gli esseri umani appena arrivati. Le «cucce» – bidoni di plastica da 200 litri coricati su un fianco – brillavano per assenza di cibo, e quel po' di acqua che c'era aveva gelato o era estremamente sudicia. Molti cani erano ancora cuccioli.

Sul colle dietro il campo, ad attendere la squadra c'era qualcosa di più macabro, i resti di sei cani, che erano lì da più di un mese, più una decina di fosse, coperte di vegetazione che indicava che erano state usate per anni. Anche a un occhio inesperto, era chiaro che lì erano stati maltrattati degli animali; ma gli specialisti dovevano fornire prove dettagliate perché le autorità potessero sostenere adeguatamente le accuse.

Intanto i veterinari dovettero dare i primi soccorsi agli animali, curandoli però in modo da non compromettere il valore scientifico e legale delle prove dei reati di crudeltà e abbandono. Una volta vagliati uno per uno, i cani furono stabilizzati ed esaminati da esperti per individuare segni di abbandono: dimagrimento, parassiti, disidratazione. Si cercarono anche le prove del loro impiego in combattimenti organizzati, come cicatrici e ferite recenti dovute a morsi di altri cani. Secondo Robert Reisman, supervisore per le scienze forensi dell'ASPCA di New York, che era sul posto a Sandersville, i cani reduci da combattimenti presentano lesioni caratteristiche nella zona del capo, del collo e delle zampe anteriori. Gli studi hanno mostrato che l'andamento dei morsi nei cani da combattimento è diverso da quello riscontrato nelle zuffe spontanee che possono avvenire tra un cane e l'altro.

Poi gli animali sono stati portati in un rifugio temporaneo allestito a diversi chilometri di distanza, dove i veterinari li hanno fotografati e sottoposti al resto degli esami. Gli investigatori hanno continuato a fotografare il luogo dove era stato compiuto il crimine, mappare la zona, prendere note, eseguire riprese video e raccogliere elementi di prova, il tutto con la stessa meticolosa cura di quando si indaga sulla scena di un crimine contro gli esseri umani. In seguito i veterinari hanno effettuato le autopsie dei cani deceduti per determinare come erano morti.

Nel rifugio, Reisman ha esaminato 26 di quei cani per parecchi giorni. Quasi tutti erano macilenti, ricorda. «Anche se eravamo nel Sud degli Stati Uniti faceva molto freddo, e la maggior parte dei cani tremava per il peso corporeo insufficiente e la mancanza di

riparo». Per sostenere un'accusa formale di crudeltà contro animali, però, doveva provare che il ridotto peso corporeo era dovuto alla mancanza di cibo e non a malattie, per esempio un cancro. I veterinari hanno nutrito gli animali in maniera molto graduale, per giorni interi, perché mangiare di colpo troppo cibo avrebbe potuto causare uno shock al loro organismo. È stato seguito il peso corporeo di ciascuno degli animali; se fossero aumentati di peso, ciò avrebbe rivelato che il deperimento era dovuto a mancanza di cibo e non a una malattia sottostante.

Altre prove dei combattimenti tra cani avrebbero potuto facilmente sfuggire ad agenti non adeguatamente addestrati, dice Renee Arlt, incaricata delle indagini scientifiche per il Dipartimento di Polizia di Lakeland, in Florida. Un pezzo di legno, un tappeto arrotolato e un lucchetto ritrovati presso il sito di Sandersville, che possono sembrare oggetti comuni e quotidiani, hanno invece un senso ben diverso. Un tecnico addestrato riconosce nel pezzo di legno un «cuneo» usato per costringere i cani ad aprire le fauci quando ne azzannano un altro, e nel lucchetto un peso per il collare da addestramento dei cani da combattimento.

Anche la disposizione delle macchie di sangue sugli animali e intorno a essi era rivelatrice. Campioni di sangue raccolti con tamponi in diverse fosse dove si svolgevano i combattimenti sono stati inviati a un genetista per l'analisi del DNA, per accertare che fosse effettivamente sangue di cane e per identificare i singoli animali. Come per gli esseri umani, il DNA dei cani è diverso per ogni individuo e può collegare un certo cane a un certo luogo. Gli

Esperti forensi estraggono resti di cani da una delle 12 fosse comuni (*1*) scoperte in un sito in cui si tenevano combattimenti di cani presso Sandersville, in Georgia. Sono stati trovati 26 cani, legati da pesanti catene (*2*). Jason Byrd contrassegna elementi di prova sulla scena del crimine (*3*).

specialisti possono inoltre tracciare per via genetica le linee di discendenza da altri cani da combattimento già noti. Dato che molti dei capi di queste bande acquistano gli animali da importanti allevatori specializzati in cani da combattimento, tracciare le origini dei singoli cani può aiutare a scoprire i legami nascosti in attività criminali organizzate, compresa l'associazione a delinquere e gli abusi contro animali. Il DNA dei cani da combattimento è conservato in vari archivi, come il Canine Combined DNA Index System del Laboratorio di genetica veterinaria dell'Università della California a Davis.

L'analisi delle tracce ematiche sulla scena di un crimine contro un animale può differire in vari modi da quella dei casi in cui le vittime sono umane. La statura e la posizione della vittima al momento in cui subisce una lesione può rivelare parecchio di ciò che è accaduto. Per esempio, il modo in cui il sangue è spruzzato su pareti, pavimenti e altre superfici può aiutare a determinare l'altezza dell'aggressore e il tipo di armi che ha usato, purché si ricordi che gli animali hanno caratteri propri e specifici, a volte anche in contrasto con le tradizionali caratteristiche delle tracce ematiche umane. Anche gli animali a quattro zampe a volte si alzano su

2

Ovviamente, fare del male agli animali è terribile, ma se oggi questi casi sono sempre più seguiti dagli inquirenti è perché, detto un po' all'ingrosso, chi sevizia gli animali spesso fa del male anche alle persone

3

quelle posteriori per difendersi, alterando la traiettoria del sangue che cola o spruzza dalle ferite in modi che un investigatore esperto è in grado di interpretare. E molti animali hanno la coda, che può intridersi di sangue e spargerlo e spruzzarlo intorno, il che non accade con le vittime umane.

Nei vent'anni di attività di Nancy Bradley-Siemens, veterinaria forense presso il College of Veterinary Medicine della Midwestern University, c'è stato un caso in cui le macchie di sangue hanno avuto un ruolo di particolare rilievo: quello di un cane vittima di traumi da corpo contundente tanto gravi da dover essere sottoposto a eutanasia. Il sospettato sostenne che il cane lo aveva aggredito e quindi di averlo percosso per autodifesa. Ma l'accurato esame della scena chiarì che in realtà l'animale era incatenato a un piolo piantato nel terreno vicino a un recinto di mattoni. L'uomo aveva percosso selvaggiamente il cane con una pala, e poi aveva alterato la scena portando via la catena e nascondendo la pala. Furono rinvenute tracce di sangue sul recinto e sul piolo, secondo un andamento compatibile con percosse inflitte con un corpo contundente all'altezza del capo del cane. Il sangue colato sotto il corpo e sul terreno provava inoltre che il cane era legato, in contrasto con le dichiarazioni del sospettato, che, messo di fronte a queste prove, finì per confessare. Secondo Bradley-Siemens, queste analisi sono eseguite meno spesso di quanto si potrebbe, ma per assicurarne l'accurata interpretazione sono necessarie ulteriori ricerche sui tempi di coagulazione nelle diverse specie.

L'ora della morte

Anche determinare il momento della morte di un animale sulla scena di un crimine può essere importante, per esempio nel rivelare se un indiziato poteva trovarsi o meno sul posto nel momento in cui è stato compiuto un abuso. In certe circostanze si può precisare il momento della morte con qualche modifica delle tecniche usate per gli esseri umani, ma in altri casi si stanno applicando metodi nuovi. Anche qui, dalle tecniche sviluppate dalla ricerca veterinaria forense sono venuti elementi utili a far condannare degli imputati.

Indicazioni fra le più valide si ottengono dagli insetti che brulicano intorno al corpo di un animale morto. Come per i cadaveri umani, gli entomologi esaminano i vari stadi dello sviluppo degli insetti. Però il tempo richiesto perché certi insetti si insedino in un cadavere può essere diverso di specie in specie, e in particolare rispetto a un corpo umano. E le larve che mutano in pupe in animali dotati di pellicce lunghe e folte posso restare lì invece di allontanarsene come spesso accade per i resti umani.

In una delle fosse del sito dei cani da combattimento di Sandersville erano sepolti numerosi animali. La decomposizione procede più speditamente alla superficie del terreno, quindi i resti in cima alla fossa erano in larga parte scheletrici, con infestazione di insetti ridotta o nulla. I cadaveri più in basso presentavano molteplici insetti, in vari stadi di colonizzazione, e ciò ha aiutato gli entomologi a stabilire approssimativamente da quanto tempo erano morti i vari cani. Gli stadi di sviluppo dei vermi, per esempio, han-

no fornito dati su quanto a lungo erano stati sotto terra i resti.

L'analisi dei resti di Sandersville e le prove fisiche ottenute dai cani ancora vivi hanno evidenziato lesioni compatibili con combattimenti di cani organizzati, accanto a un grave stato di abbandono, fino alla denutrizione. Anche a vari livelli di decomposizione, era possibile vedere cicatrici compatibili con combattimenti organizzati. Il lavoro dell'équipe forense è stato la base per le accuse dell'ufficio di Hayward Altman, procuratore distrettuale del Middle Judicial Circuit della Georgia. Vari esperti dell'ASPCA hanno reso decisive testimonianze su quanto avevano osservato sul posto. Alla fine dei tre giorni del processo, Derrick Montez Daniels, di DeKalb County, in Georgia, e Billy Taylor Jr., di Sandersville, sono stati riconosciuti colpevoli di 26 capi d'accusa per maltrattamenti contro animali. Daniels è stato condannato a cinque anni di reclusione in un carcere statale più cinque anni di libertà vigilata, e Taylor a un anno da scontare in un carcere della contea più nove di libertà vigilata.

Un cane vittima di un giro di combattimenti illegali a Sandersville esaminato da esperti forensi per accertarne deperimento, disidratazione e presenza di parassiti.

Difficoltà specifiche

Un'altra difficoltà per i veterinari forensi nasce dall'impossibilità di domandare agli animali che cosa hanno subito. Ma il linguaggio del corpo può essere rivelatore. Un veterinario esperto può capire se un animale sta soffrendo osservandone comportamento, aspetto, mobilità e reazioni all'essere maneggiato e agli analgesici. Un gallo per esempio, nota Touroo, quando soffre può essere «estremamente quieto e indifferente agli stimoli, stare a testa bassa e trarre respiri profondi. Giudici e giurie potrebbero vedere un video di un gallo chiaramente sofferente e non cogliere quei segni» senza la guida di un esperto.

Un altro possibile problema per gli investigatori è che le ignare vittime possono distruggere delle prove, cosa che accade regolarmente. Touroo ha lavorato su un caso in cui un cane ferito da una pallottola era rimasto nascosto per giorni, leccandosi le ferite. «Ciò ha reso estremamente difficoltoso distinguere il foro di entrata da quello di uscita», dice. Insieme a un esperto locale, Touroo ha usato le radiografie per valutare il danno subito da ossa e tessuti molli sotto gli strati danneggiati della pelle e determinare la direzione della pallottola, rivelando che il cane era rivolto in direzione opposta allo sparatore e smentendone la dichiarazione di aver sparato perché aggredito.

Altre difficoltà insorgono nelle autopsie. Per esempio vi sono pochissimi studi sull'effetto dei traumi sui capelli umani, e tanto meno su peli, manti e pellicce animali. Uno studio recente sui capelli umani ha rilevato però che le fibre appaiono diverse quando sono state tagliate da un coltello o con le forbici. Nel 2012, in Alabama, un carlino di nome Bama fu ritrovato in condizioni orribili; pareva che fosse stato spellato vivo, secondo molti da un aggressore umano. Ma l'esame del pelo e delle ferite condotto da Touroo assodò invece che ad aggredire Bama era stato un altro animale. I ricercatori ritengono inoltre che potranno ottenere più informazioni man mano che migliora la capacità di usare i dati delle autopsie per rivelare gli effetti di vari tipi di armi, e le lesioni associate a specifici tipi di maltrattamenti. Per esempio, secondo l'esperienza di Reisman le fratture di cranio, costole e femore sono frequenti nei casi di maltrattamenti fisici intenzionali, ma non negli incidenti stradali. Continuare ad arricchire questo corpus di ricerche renderà più facile ai veterinari forensi accertare le cause delle lesioni.

Decifrare il DNA

Per quanto utili siano gli elementi di prova rinvenuti sulla scena di un crimine, a volte per chiudere un caso ci vuole qualcosa di più: test genetici e altri esami di laboratorio. Strumenti utili nei casi con vittime umane, come l'analisi del DNA, sono ancora piuttosto rari in quelli relativi agli animali, ma ci sono stati passi in avanti.

Reisman ha seguito da veterinario forense due casi alla fine dello scorso decennio, i primi in cui a New York è stato usato il DNA per dimostrare accuse di crudeltà contro animali. In uno di essi, una gatta di quattro anni di nome Madea era stata percossa selvaggiamente, tanto da dover essere sottoposta a eutanasia. Nell'esaminare la scena, uno dei detective trovò un ombrello in una custodia di plastica dura, su cui Reisman individuò punture e graffi compatibili con morsi di gatto; poi trovò una corrispondenza tra la saliva del gatto rimasta sull'ombrello e il DNA tratto dai campioni di tessuto di Madea, collegando l'arma alla vittima. L'analisi, unita alle testimonianze, ha condotto a una condanna per maltrattamenti aggravati e danneggiamenti intenzionali.

Un'altra tecnica emergente è l'uso dell'RNA come ausilio per determinare il momento della morte di un animale. L'RNA è relativamente stabile nel tempo e si degrada a velocità prevedibile. Conoscendo il grado di degradazione dell'RNA si può risalire all'indietro e stimare in maniera ragionevolmente accurata il momento della morte. Nanny Wenzlow, che ha da poco concluso una *fellowship* in patologia veterinaria forense all'Università della Florida, sta svolgendo un lavoro pionieristico in questo campo sui

Il collare era così stretto da essere incorporato nella pelle del cane. Laura Niestat tiene in mano la relativa foto; dietro, lo scheletro di un cane su cui si cercano segni di traumi.

Bebeto Matthews/AP Photo

tessuti equini, e ha sviluppato algoritmi per la degradazione dell'RNA nel cervello, nel muscolo e nel fegato dopo la morte – il tasso è differente nei diversi organi – che possono servire a stabilire quando un animale è morto. E ciò può confermare o smentire l'alibi di un indiziato, nota la ricercatrice.

Fermare le violenze

Malgrado i successi della medicina veterinaria forense, servono ancora molti studi. «Il campo è ancora così nuovo, e siamo ancora tanto indietro rispetto alla medicina forense clinica e patologica umana», dice Touroo dell'ASPCA. E ci vogliono più esperti di indagini scientifiche nel campo dei crimini contro gli animali. Quando Reisman cominciò a lavorare per l'ASPCA, nel 1988, la medicina veterinaria forense non era neppure riconosciuta come disciplina autonoma. Molti dei materiali utilizzati oggi nascono, attraverso prove ed errori, dal lavoro dello stesso Reisman, che ha poi contribuito a fondare l'International Veterinary Forensic Sciences Association, che vanta quasi 130 iscritti in 16 paesi.

L'unico programma universitario che propone un percorso formativo completo e un'attività di ricerca specifica in questo campo negli Stati Uniti è l'ASPCA Veterinary Forensic Sciences Program dell'Università della Florida, di cui uno di noi (Byrd) è responsabile didattico, e in cui insegnano Touroo e altri colleghi. Il corso di specializzazione insegna ai veterinari come raccogliere le prove in modo corretto e li prepara a testimoniare in tribunale come esperti.

Studenti e docenti del programma sono impegnati nella ricerca per far progredire il campo. Per esempio stanno stabilendo come stimare al meglio il sesso di un cane a partire dal cranio, cosa che negli esseri umani si fa con buona attendibilità. Inoltre lavorano sulla descrizione degli aspetti caratteristici di cicatrici e ferite dei cani da combattimento. E, in collaborazione con la Tufts University, hanno mostrato, come dicevamo sopra, che cani e gatti subiscono lesioni diverse se urtati da un'auto o percossi intenzionalmente da una persona. È uno studio che può aiutare i veterinari forensi a smascherare atti di crudeltà intenzionali fatti passare per incidenti.

Reisman, da parte sua, sta aiutando NYPD e ASPCA a costituire un database di casi a New York, con informazioni come natura dell'abuso (abbandono o aggressione), tipo delle lesioni e durata del periodo di tempo in cui si sono verificate, eventuale presenza concomitante di violenza domestica o abusi su minori, e specie, razza, età e sesso degli animali coinvolti. La sua speranza è che nel tempo questi dati servano alle varie agenzie per capire meglio le vittime animali e i loro aggressori, scoprendo andamenti ricorrenti. Per esempio, c'è differenza nell'aspetto delle lesioni quando a causarle sono uomini, donne o bambini? Oppure, quanto spesso viene ucciso un animale nei casi di violenza domestica? Gli esperti sperano inoltre che migliorare la preparazione di poliziotti, addetti al controllo degli animali e altri professionisti possa condurre a processi e condanne più efficaci e requisiti più stringenti per le sentenze, e di conseguenza a un complessivo calo dei maltrattamenti contro gli animali. Attraverso l'Università della Florida si tengono regolarmente dei workshop, ed esperti come Reisman, Touroo e altri tengono sedute di formazione in tutto il paese.

Anche le vittime umane possono beneficiare dei progressi della medicina veterinaria forense. Uno studio comparso nel 1998 su «Journal of Emotional Abuse» ha trovato che il 71 per cento delle donne ospitate nei rifugi contro le violenze domestiche riferiva che gli autori delle violenze avevano maltrattato, ucciso o minacciato i loro animali. Nel 2007 una ricerca pubblicata su «Journal of Interpersonal Violence» ha mostrato che «gli uomini violenti che maltrattano anche i propri animali sono più dispotici e praticano forme di violenza più pericolose rispetto a quelli che non lo fanno». Diane Balkin, avvocata dell'Animal Legal Violence Fund, aggiunge: «La violenza è violenza, che la vittima abbia due gambe o quattro zampe. Un intervento precoce su un bambino o un giovane che maltratta un animale può impedire che poi arrivi a fare del male a un altro animale o un essere umano, e può anche far avere a quella persona diagnosi e trattamenti di cui ha un vero bisogno».

Randall Lockwood, vicepresidente dell'ASPCA per scienze forensi e progetti contro la crudeltà sugli animali, concorda: «So che ci sono animali, donne, bambini e anziani che oggi sono vivi e che probabilmente non lo sarebbero» se gli inquirenti non avessero portato in tribunale degli individui violenti. La medicina veterinaria forense, dice, «dà voce alle vittime». ■

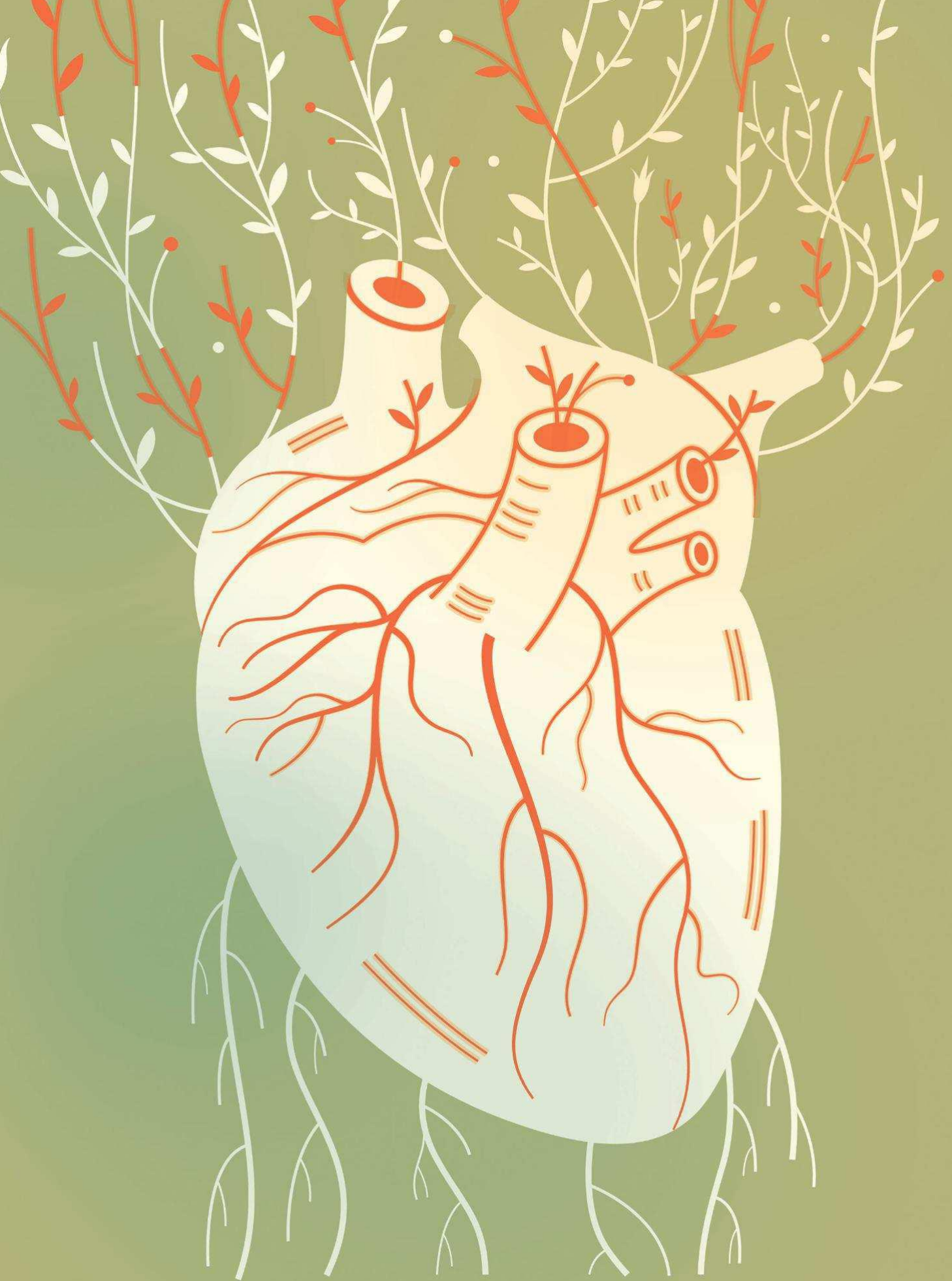
PER APPROFONDIRE

Veterinary Forensics: Animal Cruelty Investigations. Merck M.D. (*a cura*), seconda edizione, Wiley-Blackwell, 2012.

Forensic Pathology of Companion Animal Abuse and Neglect. Gerdin J.A., e McDonough S.P., in «Veterinary Pathology», Vol. 50, n. 6, pp. 994-1006, novembre 2013.

ASPCA Veterinary Forensic Sciences Program, Università della Florida: **http://forensics.med.ufl.edu.**

National Link Coalition, una risorsa sui rapporti fra violenza contro animali e violenza contro esseri umani: **http://nationallinkcoalition.org.**

CARDIOLOGIA

Terapia per il CUORE

Riuscire a controllare la capacità intrinseca di guarigione del cuore può aiutare a prevenire l'infarto e a ridurre gli effetti dolorosi causati dal marcato restringimento delle arterie coronarie

di Gabor Rubanyi

Illustrazione di Harry Campbell

Gabor Rubanyi è medico e cofondatore di Angiogenetics, una società che sta sviluppando un protocollo di terapia genica per far crescere nuovi vasi sanguigni nel cuore.

Il cuore umano batte più di 100.000 volte al giorno, pompando circa 7500 litri di sangue ossigenato attraverso l'aorta fino al resto dell'organismo. Circa il 5 per cento di questo flusso si fa strada fra due vasi sanguigni principali, le arterie coronarie, che lo dirigono verso una rete di vasi sanguigni sempre più piccoli, che nutrono ogni fibra del muscolo cardiaco.

Se qualcosa interrompe la circolazione in uno o più punti dei vasi coronarici, come per esempio un coagulo oppure uno spesso aggregato di materiale grasso (placca aterosclerotica) sulle pareti delle arterie, sottrae ossigeno e nutrienti alle cellule cardiache adiacenti. A meno che il flusso del sangue non riprenda rapidamente, la regione del muscolo cardiaco che ha sperimentato la carenza di ossigeno e nutrienti muore, e la persona subisce un infarto. A seconda della maggiore o minore entità del danno, il cuore può faticare a funzionare correttamente, o può addirittura smettere di pompare, causando un decesso.

Dato che le cellule del muscolo cardiaco non muoiono immediatamente in seguito alla mancanza di ossigeno, molte possono essere conservate se il paziente è ospedalizzato abbastanza rapidamente da permettere ai medici di agire prima che si verifichi un danno permanente. Fra l'altro i medici potrebbero mantenere aperte le arterie ostruite usando uno *stent* o intervenendo per via chirurgica con un *bypass* a livello della sezione dell'arteria bloccata. Queste procedure sono usate anche per cercare innanzitutto di prevenire gli infarti così come per diminuire il dolore (angina) che spesso accompagna un restringimento grave delle arterie, ma non funzionano sempre, e talvolta portano nuovi problemi.

In realtà il cuore ha una sua modalità specifica di affrontare i blocchi nelle arterie coronarie. Può sviluppare nuovi canali - chiamati vasi collaterali - che ridirigono il flusso sanguigno da diverse nuove direzioni alle aree ipossiche del muscolo cardiaco. I vasi collaterali sono presenti fin dalla nascita, ma di solito non trasportano sangue. Aumentano di dimensione e possono anche formarsi dopo che si è verificato un blocco grave o il restringimento delle arterie coronarie e dopo appena poche settimane. In una persona con un sistema collaterale ben sviluppato, il flusso sanguigno aggiuntivo può essere sufficiente a mantenere il tessuto cardiaco ben nutrito anche a fronte di un vaso completamente ostruito. Troppo spesso, però, la naturale circolazione collaterale non è all'altezza del compito.

Molti ricercatori, tra i quali il sottoscritto, hanno trascorso gli ultimi vent'anni sperimentando diversi modi per stimolare il cuore a produrre nuovi vasi collaterali che siano in grado di fornire un adeguato flusso sanguigno al cuore di pazienti le cui fibre muscolari non stiano ricevendo sufficiente ossigeno. In questo modo speriamo di ridurre il dolore provato da molti pazienti con un problema di aterosclerosi in fase avanzata e di evitare l'infarto in pazienti che non possono più essere aiutati da stent o da un intervento chirurgico per il bypass. Finora i nostri sforzi - che hanno incluso l'iniezione nel cuore di diverse proteine, geni e cellule - non hanno prodotto un rimedio che funzioni abbastanza bene per la maggior parte delle persone le cui arterie si sono ristrette in modo pericoloso. Negli ultimi anni, comunque, alcuni di noi che lavorano nell'industria e nelle università hanno raffinato in modo notevole le procedure terapeutiche. Un certo numero di questi approcci viene ora combinato nei trial umani che dovrebbero essere completati in un futuro non molto lontano.

Se avremo successo, le prime persone a notare la differenza saranno probabilmente quelle che soffrono di angina, che si manifesta durante stress o attività fisica quando le arterie coronarie danneggiate dall'aterosclerosi non possono più fornire tutto l'ossigeno necessario al tessuto cardiaco. Per tutta una serie di ragioni, trattamenti standard con farmaci, stent o chirurgia non possono aiutare milioni di pazienti con angina in tutto il mondo, di cui 850.000 negli Stati Uniti, secondo le stime. Una terapia nuova che alleviasse i sintomi migliorerebbe sensibilmente la loro qualità della vita, permettendo a molti, per esempio, di fare una passeggiata nel quartiere invece di rimanere confinati a casa. Dovrebbe anche aiutare almeno una certa parte di questi pazienti a evitare un primo attacco di cuore o una recidiva.

IN BREVE

Il cuore ha la capacità di sviluppare nuovi vasi sanguigni quando si trova in condizioni di costrizione.

Questa «circolazione collaterale» può fare la differenza fra la vita e la morte in seguito a un infarto, generando nuovi canali grazie ai quali veicolare il flusso del sangue fino alle regioni danneggiate del muscolo cardiaco.

Per ragioni che non sono ancora del tutto chiare, tuttavia, la maggior parte dei pazienti cardiopatici non riesce a sviluppare una buona rete di circolazione collaterale.

I ricercatori stanno testando terapie genetiche e cellulari che possano promuovere la crescita di nuovi vasi sanguigni nel cuore. Se questo approccio avrà successo, allora le cure potrebbero aiutare milioni di persone a evitare il dolore toracico, la cosiddetta angina, o a prevenire l'infarto.

Nuove strategie per un cuore che soffre

A volte il cuore ha la capacità di sviluppare nuove arterie. I ricercatori testano terapie geniche per stimolare questa capacità rigenerativa in modo da ripristinare un flusso ematico ossigenato in una regione del muscolo cardiaco in cui la circolazione normale si è ridotta a causa di un accumulo lipidico (una placca aterosclerotica) in uno o più vasi sanguigni principali. Se queste terapie avessero successo, si potrebbero usare, tra l'altro, per attenuare il dolore toracico che spesso insorge quando una parte del cuore non riceve abbastanza ossigeno (una condizione chiamata ischemia).

Illustrazioni di Harry Campbell

Formazione collaterale

Il primo passo verso la concezione di una terapia che stimoli crescita e sviluppo di nuovi vasi sanguigni nel cuore consiste nel capire perché i vasi collaterali talvolta compaiono e maturano per conto proprio. Per anni i ricercatori hanno discusso su quale delle due diverse forze in azione induca i canali collaterali già esistenti a trasformarsi in arterie di medio calibro: l'aumento del flusso del sangue nei canali, oppure una minor quantità di ossigeno nel muscolo cardiaco malandato? Queste condizioni possono verificarsi ogni volta che l'interno di un'arteria coronaria si restringe in modo marcato. La pressione all'interno dell'arteria oltre il punto di ostruzione diminuisce, perché una minor quantità di sangue riesce a fluire attraverso lo spazio più piccolo. Questa riduzione provoca una situazione di squilibrio, che spinge il flusso di sangue nei vasi collaterali a valle da altre regioni cardiache non colpite. Allo stesso tempo il tessuto cardiaco oltre il punto arterioso ristretto riceve meno ossigeno perché riesce a passare una minore quantità di sangue. Alcune ricerche hanno prodotto più prove che confermano l'aspetto collegato al flusso ematico; altre puntano il dito sui bassi livelli di ossigeno.

In realtà sembra che entrambi i processi abbiano un ruolo importante nello sviluppo del circolo collaterale nel cuore umano. Il nuovo flusso di sangue nei canali ausiliari genera forze di taglio che provocano il rilascio di proteine, chiamate fattori di crescita, dalla parete interna del vaso, l'endotelio, che a loro volta stimolano le pareti a rinforzarsi e il diametro interno ad aumentare, in modo che le nuove arterie in via di maturazione possano gestire un aumento del flusso ematico. Nel frattempo la carenza di ossigeno nel muscolo cardiaco stimola il rilascio di altri fattori di crescita, che inducono la formazione di nuovi canali collaterali, che possono diventare piccole arterie.

Negli ultimi 15 anni i ricercatori hanno scoperto che appena il 20-30 per cento dei pazienti cardiopatici ha una circolazione collaterale ben sviluppata. Nessuno è certo del perché sia così, ma nella maggior parte delle persone con malattie coronariche la rete collaterale non si sviluppa a sufficienza da aggirare i blocchi presenti nelle arterie coronarie. Alcuni studi suggeriscono che elevati livelli di colesterolo nel sangue e il danno ai piccoli vasi sanguigni causato dal diabete, in particolare, possano interferire con la capacità dei vasi collaterali di cambiare.

Tuttavia, avere vasi collaterali utili nel cuore può fare la differenza fra la vita e la morte. In uno studio pubblicato on line nel 2013, che ha esaminato 845 persone con cardiopatie gravi, Christian Seiler, della Clinica universitaria di Berna, in Svizzera, e colleghi hanno dimostrato che i pazienti il cui afflusso di sangue collaterale poteva sostituire almeno il 25 per cento di quello che un tempo era il loro normale flusso coronarico avevano una probabilità del 67 per cento più bassa di morire a causa di problemi cardiaci nel corso di dieci anni.

Sfide della ricerca

Negli ultimi anni la ricerca ha scoperto solo un metodo confermato per promuovere la circolazione collaterale nel cuore: l'esercizio fisico, che spinge l'organo a funzionare a un livello superiore rispetto al normale per un periodo prolungato. Uno studio tedesco che ha esaminato 60 uomini con coronaropatia grave pubblicato nel 2016 ha dimostrato che dieci ore di esercizio fisico ad alta intensità o 15 ore a intensità moderata alla settimana, per un mese, aumentavano la quantità di sangue che poteva fluire attraverso il circolo collaterale di circa il 40 per cento. Il gruppo dell'intensità moderata si allenava da sei a otto volte al giorno al 60 per cento delle proprie capacità, con il 100 per cento che rappresentava lo sforzo massimo che avrebbero potuto fare senza scatenare dolore al petto. Il gruppo ad alta intensità si allenava quattro volte al giorno al 95 per cento delle proprie capacità (un livello a cui le persone a volte sentono dolore toracico), tutti sotto il controllo di medici esperti e di preparatori atletici. Probabilmente il miglioramento del 40 per cento corrisponde circa al massimo teorico di quello che è fisiologicamente possibile, sulla base di studi di laboratorio condotti sui cani, che hanno dimostrato che il circolo collaterale può sostituire circa un terzo della normale circolazione attraverso le arterie coronarie.

È presumibile che la maggiore attività fisica aumentasse la pressione nelle arterie coronarie dei partecipanti, e questo a sua volta forzava il sangue a fluire nei vasi collaterali. Il lavoro fisico giornaliero regolare, poi, stimolava le pareti ad allargarsi e a ispessirsi per gestire un maggior flusso di sangue. Non è chiaro se l'allenamento stimolasse anche la crescita di nuovi vasi collaterali, dal momento che questi vasi, anche se si erano formati, inizialmente sarebbero stati troppo piccoli per comparire in un angiogramma, una tecnica di scansione ai raggi X che serve a visualizzare le arterie coronarie.

Comunque, per molte persone con malattie cardiache in fase avanzata svolgere anche solo esercizio fisico moderato non è un'opzione; da qui la ricerca della giusta combinazione di proteine su misura, geni o cellule che inducano il cuore a espandere il suo circolo collaterale.

Geni e staminali

Alcuni dei primi tentativi si sono focalizzati su due proteine, conosciute con il loro acronimo VEGF e FGF, che stimolano la crescita dei vasi sanguigni. Sebbene diversi studi iniziali e di ridotta entità con questi e altri fattori di crescita sembrassero promettenti, studi di follow-up effettuati su un numero maggiore di pazienti hanno messo in luce diversi aspetti critici. Forse il problema principale è stato che i medici dovevano somministrare elevate quantità di proteine per un lungo periodo di tempo per ottenere la formazione di qualche nuovo vaso sanguigno nel cuore. Nel frattempo, altre parti del sistema circolatorio in altre zone nell'organismo reagivano in modo infelice, provocando un calo della pressione, a volte grave, ed è stato necessario interrompere le terapie sperimentali.

Alcuni ricercatori si sono orientati sulla terapia genica nella speranza di aggirare problemi causati dall'uso di proteine. L'idea è iniettare geni che contengono le istruzioni molecolari per produrre VEGF, FGF o altre proteine direttamente nel cuore, solitamente inserendo i geni in un virus relativamente benigno che infetta le cellule cardiache. Una volta inseriti con successo, i geni possono produrre in serie i fattori di crescita necessari per un periodo di tempo prolungato, dove sono necessari.

Sebbene gli scienziati abbiano in effetti indotto comparsa e maturazione di vasi sanguigni collaterali nel cuore di animali da laboratorio, finora nessun trial clinico di terapia genica su larga scala per il cuore umano ha dimostrato un beneficio significativo, forse perché i geni iniettati non hanno raggiunto un numero sufficiente di cellule cardiache. Per amor di trasparenza: la mia azienda, Angiogenetics, sta cercando di sviluppare una di queste terapie basata sul gene che produce FGF. I nostri studi hanno identificato quello che potrebbe essere un metodo più efficace per far arrivare il materiale genetico a una regione più ampia del cuo-

re, che è fondamentale per formare un numero sufficiente di vasi collaterali. Nel settembre 2016 la Food and Drug Administration degli Stati Uniti ci ha concesso l'autorizzazione a iniziare test avanzati con il nostro prodotto su 320 persone.

Alla fine alcuni ricercatori hanno cercato di usare le cellule staminali adulte ottenute dal midollo osseo oppure dal sangue di un paziente per cercare di indurre un cuore malato a sviluppare vasi sanguigni aggiuntivi. La logica alla base di questo approccio è che le cellule staminali adulte possono produrre una grande varietà di fattori di crescita, ed è probabile che siano necessari molteplici fattori di crescita - in combinazioni attentamente calibrate - per generare il numero appropriato di vasi sanguigni collaterali.

Uno degli elementi che complicano la questione è il fatto che non è sempre facile identificare quante delle cellule iniettate rimangono funzionali nel cuore. Ciò nonostante, diversi trial clinici di piccola entità effettuati nel corso degli ultimi dieci anni hanno prodotto alcune scoperte incoraggianti, come il fatto di permettere ai pazienti trattati di svolgere attività fisica per qualche minuto in più rispetto ai pazienti non trattati, senza provare dolore. Tuttavia, come è accaduto in precedenza con le proteine con e la terapia genica, finora nei trial clinici di terapia cellulare su larga scala non è stato documentato nessun beneficio sostanziale.

Una terapia nuova che allevia i sintomi dell'angina (dolore toracico) migliorerebbe in modo significativo la qualità di vita di molti pazienti, permettendo loro, per esempio, di fare una passeggiata attorno alla propria abitazione invece di rimanere confinati in casa

Che cosa abbiamo imparato

Vent'anni trascorsi a cercare di capire in che modo far crescere vasi sanguigni collaterali nel cuore, senza trovare una soluzione ampiamente efficace e senza gettare la spugna, possono sembrare un periodo lungo. Ma tutto quello che i miei colleghi di settore e io abbiamo imparato finora conferma la nostra impressione sul fatto che è possibile ottenere la stimolazione della crescita del circolo collaterale, e che potrebbe aiutare molte persone. Quel che dobbiamo fare adesso è mettere insieme tutte le informazioni e gli indizi che abbiamo scoperto con le nostre ricerche e iniziare ad applicarli in modo più sistematico in ciascuna delle imprese che iniziamo.

Ora per esempio abbiamo capito meglio in che modo ogni potenziale terapia dovrebbe essere somministrata al cuore per ottenere il massimo delle risposte. Nel corso degli anni, i ricercatori hanno scelto di somministrare la loro terapia sperimentale preferita in uno dei tre modi seguenti: direttamente nel muscolo cardiaco, da dove si diffonde in una piccola regione tra le fibre; nel cuore, attraverso una vena cardiaca, spingendola controcorrente rispetto al flusso ematico; o attraverso un'arteria coronaria che la trasporta nella stessa direzione del flusso sanguigno. Diversi studi hanno ora dimostrato che l'unico modo di raggiungere i canali collaterali esistenti stimolando allo stesso tempo la formazione di un nuovo circolo collaterale consiste nell'iniettare farmaci sperimentali in una o più arterie coronarie. I canali coronarici collaterali esistenti sono davvero troppo distanti dai siti dell'inoculo sia nel muscolo cardiaco sia nelle vene per trarre beneficio dalla terapia. Abbiamo anche imparato che bloccare temporaneamente la circolazione gonfiando un piccolo palloncino all'interno dell'arteria mentre somministriamo il farmaco rende le pareti dei vasi più permeabili, permettendo a una maggiore quantità di farmaco di raggiungere il cuore.

Oltre a questo, uno degli ostacoli più impegnativi per dimostrare che una terapia può generare vasi collaterali utili nell'essere umano è avere la certezza del fatto che stiamo curando i pazienti giusti nei trial clinici. Con tutta probabilità, i rimedi per espandere i vasi collaterali esistenti e farne crescere di nuovi non riusciranno a produrre alcun effetto nel 20-30 per cento dei pazienti la cui circolazione collaterale è già ben sviluppata. Se queste persone prenderanno parte ai nostri studi sperimentali, la mancanza di un loro miglioramento potrebbe mettere in ombra i benefici per altri; combinare la media dei risultati di questo 20-30 per cento di pazienti con quelli di chiunque altro potrebbe sminuire artificiosamente i risultati complessivi, dando l'impressione che la terapia sia fallita.

A oggi, il metodo più accurato per misurare la circolazione collaterale di una persona consiste nell'inserire in un'arteria coronaria un piccolo palloncino attraverso un catetere, gonfiando il pallone per bloccare brevemente la circolazione e poi misurando la quantità di sangue che ancora riesce a fluire attorno al sito dell'ostruzione, presumibilmente attraverso i vasi collaterali. Realisticamente, una simile procedura è troppo complessa e costosa per identificare la maggior parte dei pazienti che potrebbero beneficiare dalla produzione di vasi sanguigni in eccesso nel loro cuore, e per verificare se la terapia sia stata loro di aiuto. Tecniche meno invasive per stimare l'entità della circolazione collaterale sono state sì sviluppate, ma non sono ancora così accurate come dovrebbero essere. Dobbiamo mettere a punto un modo semplice e standard per misurare il flusso collaterale in modo da identificare buoni candidati per questo approccio, e riconoscere il successo quando lo otteniamo.

Tenendo presenti queste e altre lezioni apprese con fatica, credo che siamo sulla strada giusta per sviluppare nuove terapie per stimolare la crescita di arterie collaterali nel cuore. Nei prossimi anni dovremmo finalmente riuscire a offrire un'alternativa che funziona a centinaia di migliaia di pazienti cardiopatici che, al momento, non hanno altre possibilità. ■

PER APPROFONDIRE

The Collateral Circulation of the Heart. Meier P. e altri, in «BMC Medicine», Vol. 11, articolo n. 143, pubblicato on line, 4 giugno 2013.

Angiogenic Gene Therapy for Refractory Angina. Rubanyi G.M., in «Expert Opinion on Biological Therapy», Vol. 16, n. 3, pp. 303-315, 2015.

Coronary Collateral Growth Induced by Physical Exercise: Results of the Leipzig EXerCIse Training versus MEdical Management in Patients with Stable Coronary Artery Disease (EXCITE) Trial. Möbius-Winkler S. e altri, in «Circulation», Vol. 133, n. 15, pp. 1438-1448, 12 aprile 2016.

Una cura per i mali di ciascuno di noi. Lewis R., in «Le Scienze» n. 535, marzo 2013.

Il terremoto che ha deviato il Po

Un sisma di quattro secoli e mezzo fa costrinse il fiume più lungo d'Italia a deviare la foce decine di chilometri più a nord e diede vigore a superstizioni religiose

di Livio Sirovich

Il messo a cavallo proveniente dal Vaticano raggiunse il duca Alfonso II d'Este pochi giorni dopo il disastroso terremoto del 17 novembre 1570, che causò a Ferrara una settantina di morti. La corte era rifugiata in tenda sulla riva del Po, che allora bagnava ancora le mura della città. L'ambasciatore estense riferiva la risposta del Santo Padre alla richiesta di benedizione inoltrata dal duca dopo la sciagura. Conosciamo questa corrispondenza dagli studi di Emanuela Guidoboni, storica dei terremoti.

IN BREVE

Da millenni ormai il sollevamento dell'Appennino costringe il fiume Po a spostare il proprio corso verso nord.

Il terremoto che l'11 novembre 1570 colpì Ferrara e dintorni fu la goccia che fece traboccare definitivamente il fiume verso il ramo più settentrionale, fino ad allora secondario, che si era aperto nel XII secolo. Questo esito avrebbe sollecitato superstizioni religiose a danno della locale comunità ebraica.

Una tecnica elaborata dall'autore e dai suoi colleghi ha permesso di ricalcolare geometria e meccanismo di rottura della faglia che provocò quel sisma del 1570: è la prima volta nel caso di un terremoto così antico.

Una migliore conoscenza del terremoto di quattro secoli e mezzo fa ha anche aiutato a comprendere meglio gli eventi sismici che hanno colpito l'Emilia nel 2012.

Foce bianca.
Immagine satellitare dell'attuale delta del Po, basata sui dati provenienti dal satellite Sentinel 2A, che fa parte del programma europeo Copernicus. L'immagine è datata 14 gennaio 2017, in effetti come si può vedere c'è la neve. I dati satellitari di questa immagine sono stati elaborati da e-GEOS espressamente su richiesta di «Le Scienze».

Altro che benedizione, secondo il papa questo cataclisma del XVI secolo era stato un castigo divino, perché il duca aveva dato ospitalità agli ebrei in fuga da Spagna, Portogallo e Stato Pontificio: «Noi [papa Pio V, N.d.A.] abbiamo fatto dire altre volte al signor duca per i suoi ministri che levasse di quella città giudei e marrani e non ha mai fatto niente: crediamo che fosse stato bene ci avesse creduto». L'ambasciatore aveva risposto: «Beatissimo padre, né giudei né marrani han causato il terremoto, essendo cosa naturale». E il Pontefice: «Sì, ma il governare ancora i cattivi uomini nelle sue città, fa che il Signor Iddio permetta queste influenze et massima per quelli marrani che sono giudei et fingono il cristianesimo». A tagliare la testa al toro provvide l'immediato chiarimento ufficiale del Papa: «Sebbene i terremoti siano generati da cause naturali – scriveva Pio V – non di meno occorre esaminare se mai i peccati umani non offrano ad esse motivo. Suole infatti talvolta Dio, anche in queste cose dar segno in modo non oscuro della Sua ira contro il popolo e persino contro gli stessi Prìncipi, per avvertire, per Sua misericordia, la città e il popolo di supplicare umilmente con cuore puro».

Ma perché due ricercatori dell'Istituto nazionale di oceanografia e di geofisica sperimentale (OGS), l'amico Franco Pettenati e chi scrive, hanno messo il naso in questa storia del XVI secolo, scrivendoci un articolo di sismologia, pubblicato sul «Journal of Geophysical Research», la più prestigiosa rivista internazionale di geofisica? Che ha anche pubblicato un comunicato stampa al riguardo perché era spiegato lo spostamento definitivo della foce del Po dalle Valli di Comacchio alla posizione attuale, una quarantina di chilometri più a nord.

Facciamo un passo avanti dal punto di vista temporale, e arriviamo al doppio terremoto avvenuto in Emilia nel maggio 2012.

Ricordiamo tutti lo scoramento che ci colse nove giorni dopo la scossa del 20 maggio (magnitudo M = 6,1), quando la seconda botta, il 29 maggio (magnitudo 5,9), causò altri morti. Poco dopo, la Commissione grandi rischi diffuse un mezzo avvertimento: «Nel caso di una ripresa dell'attività sismica nell'area già interessata dalla sequenza in corso, è significativa la probabilità che si attivi il segmento [di faglia; N.d.A.] compreso tra Finale Emilia e Ferrara con eventi paragonabili ai maggiori eventi registrati nella sequenza».

Ci fu qualche polemica, qualcuno disse che la commissione era condizionata dal timore di finire sotto processo come la precedente dopo il terremoto dell'Aquila del 2009. Forse. Ma gli addetti ai lavori conoscevano due circostanze preoccupanti. Primo, la rottura della crosta terrestre durante un terremoto trasferisce sforzi alle zone circostanti e se c'è in giro un'altra faglia già «carica» al punto giusto può innescarsi un nuovo sisma. Presumibilmente era stato questo meccanismo ad aver provocato la seconda scossa, circa 20 chilometri a ovest-sud-ovest della prima (*si veda il box nella pagina a fronte*). E non si poteva scartare l'ipotesi per cui la prima scossa avesse sollecitato anche altre zone, magari lungo la possibile prosecuzione della faglia verso est. La seconda preoccupazione riguardava il terremoto che nel 1570 aveva colpito la zona di Ferrara proprio verso est. Inoltre i geologi sapevano che le pieghe appenniniche sepolte dalle alluvioni sono in sollevamento a una velocità media di poco meno di un millimetro all'anno. Ma della scossa del 1570 era conosciuto solo il grado di danneggiamento medio degli edifici in 51 località, compresa Ferrara. I danni erano stati studiati negli archivi di mezza Europa da Guidoboni e altri per un catalogo del 2007 dei forti terremoti in Italia e nel Mediterraneo a cura dell'Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia (INGV).

Livio Sirovich, è ricercatore associato dell'Istituto nazionale di oceanografia e di geofisica sperimentale di Trieste, studia la sismologia ingegneristica e la geologia dei terremoti ed è coautore di un modello cinematico delle sorgenti sismiche.

Ora, gli eventi antichi possono essere studiati solo dai danni verificatisi all'epoca e – raramente – dalle vecchie rotture di faglia trovate in superficie. Teniamo presente che i terremoti non causano danni regolarmente decrescenti con la distanza dall'epicentro secondo cerchi concentrici. A seconda del meccanismo di frattura in profondità, emettono vibrazioni diverse e di diversa energia in varie direzioni, sicché la distribuzione dei danni costituisce una specie di «impronta» di ogni evento sismico sul territorio.

Con Pettenati avevamo messo a punto un nuovo tipo di analisi automatica capace di assumere questa impronta e di ricalcolare la forma approssimativa della faglia responsabile e il suo meccanismo di rottura, con un'elaborazione chiamata «inversione». Così abbiamo pensato di studiare l'incerto caso del 1570. L'utilità della tecnica sta nel migliorare la conoscenza dei terremoti antichi, che determinano la pericolosità regionale.

Gli eventi antichi possono essere studiati dai danni dell'epoca e di rado da vecchie rotture di faglia in superficie

Per spiegarla, partiamo da una candela: la fiamma scalda poco di lato e molto sulla verticale. Se vi bendate gli occhi ed esplorate lo spazio con un dito, dal calore percepito qua e là potete stimare la posizione della fiamma; avete fatto un'inversione geofisica. Nel caso dell'algoritmo dell'OGS si tratta di trovare gli 11 parametri di faglia che meglio rendano conto dei danni osservati (ossia delle intensità) nei centri abitati. Questi valori sono: latitudine, longitudine e profondità del punto da cui è iniziata la rottura (e fanno 3); direzione e pendenza del piano di rottura, verso del movimento sul piano (siamo a 6); velocità con cui la rottura si propaga in profondità lungo la faglia nei due sensi orizzontali, e velocità (supposta costante) con cui le vibrazioni originate da ogni segmento di faglia che si rompe raggiungono la superficie terrestre e quindi gli edifici; quantità di energia rilasciata dalla rottura (cosiddetto «momento sismico», traducibile in magnitudo) e asimmetria della rottura; totale, 11.

Nell'esempio della candela ci muovevamo in tre dimensioni. Nel caso di questa inversione geofisica, la fiamma, cioè il modo in cui la sorgente sismica emette energia, è simulata con un nostro modello, proposto nel 1996 sulla rivista della Seismological Society of America, comprendente soltanto le onde elastiche di taglio con percorsi diretti dalla sorgente ai centri abitati. (In queste onde l'oscillazione delle particelle di roccia avviene perpendicolarmente rispetto alla direzione di propagazione.) L'inversione individua come soluzione ottimale quella che simula al meglio l'impronta di danno del sisma. È un calcolo complicato, perché il risultato dalla variazione contemporanea di più parametri non è

MAPPA STORICA

Lo spostamento del delta nei secoli

Distanza tra l'antica foce e l'attuale: oltre 40 km

■ Il corso del Po subì **due grandi spostamenti** nell'VIII secolo a.C e nel XII d.C., a causa del sollevamento progressivo della Pianura padana a ridosso degli Appennini

■ La pianura a sud del Po conserva le forme di molti **meandri** di allora, tra cui quello di **Barchessoni** abbandonato nel 1000 a.C.

CORSO ATTUALE

Proiezione della faglia del terremoto di Ferrara del 1570

Faglie di scorrimento apenniniche, sepolte dalle alluvioni

Venezia
Padova
Vicenza
Brenta
Prealpi Venete
PO DI VENEZIA (attuale)
Po
Rovigo
Antica foce
PO DI PRIMARO (fino al 1570-'79)
Antico porto etrusco di Spina
CORSO ANTICO
Ferrara
Verona
Adige
Ficarolo
Barchessoni
Mantova
Mincio
Reno
Bologna
Panaro
Modena
XII d.C.
VIII a.C.
Oglio
Po
Parma
Taro
Reggio Emilia
Appennino Tosco-Emiliano
20 km
10 km

Scossa del 20/05/2012

Scossa del 29/05/2012

*Nel 1152, con la cosiddetta **rotta di Ficarolo**, il fiume aprì un nuovo corso, allora secondario, il Po di Venezia, ma il Po di Primaro rimase quello principale, navigabile, fino al terremoto del 1570*

200 km
ITALIA
Placca europea
Placca africana

Sezione semplificata da: Maesano et al., 2015

LEGENDA

- Sedimenti marini e poi continentali (alluvioni) dal Pleistocene inferiore a oggi
- Parte sommitale della catena appenninica sepolta (sedimenti di avanfossa).
- Catena appenninica sepolta, Miocene superiore
- Appennino
- Sedimenti di bacino e di piattaforma dal Triassico al Cretacico superiore
- Sedimenti di bacino e di piattaforma dal Permiano al Triassico
- Basamento formatosi nell'orogenesi precedente (Ercinica)

Il Po

Lunghezza di corso	652 km
Bacino	74.970 km^2
Rete idroviaria	circa 700 km

Nasce nel gruppo del **Monviso** (a Piano del Re, 2022 m) e attraversa tutta la **Pianura Padana** dalle Alpi Occidentali all'Adriatico

Il bacino del Po interessa **7 Regioni** (Piemonte, Valle d'Aosta, Liguria, Lombardia, Veneto, Emilia R., Toscana) e le province di Trento e Bolzano

Il corso attuale del Po (*azzurro*), il ramo imboccato dal fiume dopo il 1570 (*blu scuro*) e il vecchio corso principale (*punti rossi*). Alcuni studi, in particolare di G.B. Pellegrini e D. Castaldini delle università di Padova e di Modena-Reggio Emilia, hanno dimostrato che si verificarono due importanti cambiamenti del corso nell'VIII secolo a.C. e nel XII d.C. In verde, esempi dei molti tratti di corso e di meandri abbandonati dal Po a sud del corso attuale. Le linee bianche sono i fronti appenninici di avanzamento verso nord-est sepolti dalle alluvioni; corrispondono a superfici di faglia lungo cui le rocce che stanno a sud-ovest sono montate sopra quelle a nord-est.
Le Alpi hanno una struttura simile, ma con strutture che si accavallano verso sud. Più in grande, il fenomeno vede la convergenza e il sormonto di Appennini e Alpi sul substrato della Val Padana, che fa parte della placca adriatica. Più in grande ancora è la collisione Africa-Eurasia (con la complicazione dell'espansione del fondo del Mar Tirreno). Ma il «motore» profondo sono i movimenti del mantello, che trascina la crosta superficiale della Terra.

Marco Giannini su indicazione dell'autore

la semplice combinazione dei risultati corrispondenti ai parametri agenti da soli. A differenza della fiamma della candela, la migliore faglia teorica va cercata in uno spazio a 11 dimensioni.

Purtroppo non è possibile considerare tutte le faglie possibili e i loro infiniti meccanismi di rottura. Per velocizzare il procedimento è usato un «algoritmo genetico» elaborato da David Levine, matematico dello statunitense Argonne National Laboratory. L'algoritmo fa evolvere un certo numero di popolazioni di individui (faglie) nello spazio a 11 dimensioni, garantendo che la faglia migliore sia catturata in un tempo ragionevole (mezza giornata su un normale computer). Come detto, la faglia migliore è quella che simula al meglio i danni prodotti dal terremoto in esame: l'impronta di danno del 17 novembre 1570 era allungata in direzione nord-ovest/sud-est, con massimi dell'VIII grado in zona Ferrara.

Lo spostamento del Po

Abbiamo ottenuto la migliore simulazione delle intensità del 1570, quindi la faglia responsabile, dopo 223 iterazioni di calcolo. Le intensità vicino a Ferrara risultano un po' basse, ma la simulazione è molto buona, compreso un andamento particolare del VI

grado verso Venezia, che è causato solo dalla radiazione di energia dalla faglia ottimale e non da effetti locali dei terreni. La rottura, lunga circa 9 chilometri, avvenne lungo un piano inclinato di circa 26 gradi verso l'Appennino (verso sud-ovest), con risalita obliqua delle rocce (circa mezzo metro) sopra quelle più a nord. Il metodo di calcolo non distingue tra innalzamenti e abbassamenti, ma sappiamo che qui abbiamo accorciamento della crosta terrestre e sollevamento. Le superfici di rottura delle faglie sono usualmente rappresentate con rettangoli. L'ubicazione delle proiezioni delle due faglie di maggio 2012 è piuttosto accurata, perché basata su misure strumentali. Il nostro calcolo produce invece parametri con incertezze. Ciò significa che per il 1570 c'è il 95 per cento di probabilità che la soluzione si trovi a meno di 11 chilometri di distanza dal rettangolo che mostriamo. La rottura della faglia sarebbe iniziata dal punto di latitudine N 44,97 gradi (± 0,07) e longitudine E 11,55 (± 0,10). Quanto alla direzione e all'inclinazione del suo piano, gli intervalli sono di più o meno 16 e 6 gradi rispettivamente (*si veda il box nella pagina a fronte*.)

In conclusione, il 17 novembre 1570 si ruppe il segmento più settentrionale del fronte appenninico coperto dalle alluvioni della Pianura Padana. Da allora la deformazione si sarebbe trasmessa dal fronte più esterno (nord) verso ovest-sud-ovest, causando una rottura nel 1570, un'altra il 20 maggio 2012 e una terza nove giorni dopo. Non a caso, le tre faglie sono circa allineate. Questa interpretazione, proposta dall'OGS nel 2013 in un rapporto per la Protezione Civile, è stata sposata anche da Luciana Astiz, dell'Università della California a San Diego, e da altri esperti di Università della California a Riverside, Università del Texas, Massachusetts Institute of Technology e Harvard University incaricati nel 2014 di valutare l'ipotetica relazione tra attività petrolifera e terremoti del 2012.

Secondo il papa dell'epoca, il sisma del 1570 era stato un castigo divino per l'ospitalità data a ebrei in fuga

Nel corso degli ultimi 3000 anni circa, il sollevamento sotterraneo dell'Appennino in sponda destra (sud) ha costretto il fiume a spostare il proprio corso di circa 20 chilometri verso nord tra Guastalla e Ficarolo (fra Emilia, Lombardia e Veneto). Con i suoi 10-15 centimetri circa di sollevamento, il terremoto del 1570 fu la goccia che lo fece traboccare definitivamente verso il ramo più settentrionale – fino ad allora secondario – che si era aperto nel XII secolo durante la cosiddetta «rotta di Ficarolo» (località 17 chilometri a nord-ovest di Ferrara).

Superstizioni religiose

Il terremoto e la risposta papale colpiscono il Ducato di Ferrara in un momento delicato, anche perché tira aria di Controriforma. Alfonso II D'Este (cattolico, ma di madre calvinista) cercava disperatamente di avere un figlio maschio, altrimenti Ferrara sarebbe ritornata allo Stato Pontificio. In seguito a bolla papale, nel 1553 i libri ebraici sono finiti bruciati anche in città e l'atteggiamento dei Duchi – aperti al razionalismo e non sfavorevoli alla comunità ebraica – sembra una sfida; tanto più che nel 1555 il duca ha confermato ospitalità e diritti agli ebrei «marrani» (fuggiti dalle persecuzioni cattoliche in Spagna e Portogallo). Nel confinante Stato Pontificio i «perfidi giudei» devono invece portare il marchio della berretta gialla. Come hanno scritto Silvio Magrini nel 1943 (libro incompiuto causa la deportazione e uccisione dell'autore ad Auschwitz assieme alla moglie, pubblicato solo nel 2015) e Ioly Zorattini nel 2002, su ordine di Pio IV – fra il marzo e il giugno 1556 – 25 «marrani» sono stati torturati e bruciati in piazza ad Ancona. Viceversa, Alfonso II si circonda di intellettuali razionalisti, come il geniale architetto Pirro Ligorio, successore di Michelangelo alla fabbrica di San Pietro (rifugiato a Ferrara proprio perché caduto in disgrazia col Vaticano), o come l'intellettuale e medico ebreo Azariah Min Haadumim (alias Buonaiuto Dei Rossi). Due anni prima del terremoto, Alfonso II è arrivato a ospitare un gruppo di ebrei fuggiti dal ghetto di Bologna (Stato della Chiesa).

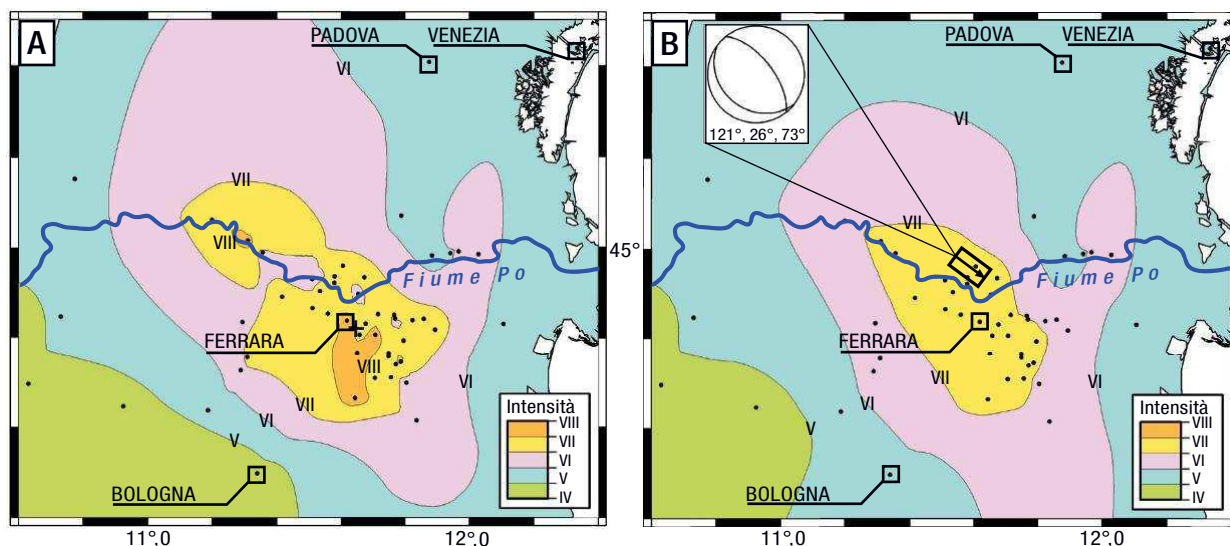
Ed ecco, come se non bastasse, la crisi definitiva del Po «Primaro» (il più antico), che lambisce le mura della città. «Attraverso il fiume – scriveva Magrini – la Ferrara del '500 guardava il mondo ed il mondo da oriente e da occidente mandava a Ferrara le sete, le spezie, i profumi, i damaschi e le armi arabescate...». Il fiume perde acqua a vantaggio del ramo secondario di Ficarolo. Alfonso II ha completato importanti lavori di dragaggio e arginatura nella primavera del 1570, ma arriva il terremoto che dà il colpo di grazia al Primaro. Un manoscritto dell'epoca descrive un fenomeno significativo per i geologi, avvenuto durante la scossa davanti a Ficarolo e notato per primo, nel 2003, da Pierfrancesco Burrato dell'INGV. Il testo è stato trovato da Guidoboni nella Biblioteca Ariostea di Ferrara; ecco la trascrizione originale: «Fu detto doppo ancor gli munari [mugnai] che mentre trete [tirò] questo quarto terremoto il Pò gonfiete, e firmete il corso suo, e tanto cresete laqua che era a pare dele rive, e doppo cessato il terremoto calete laqua al basso cam tanta velocita che quasi tuti li molini che erano ala Stelata nel po se spicorono dalli lor pali dove erano atacati». Un piccolo innalzamento del letto del fiume, ma capace di generare un temporaneo ristagno e poi un'onda di piena in grado di trascinare a valle i mulini.

Questa segnalazione è verosimile, perché molte delle faglie ricalcolate dall'inversione potrebbero avere alzato il greto del Po nella zona di Ficarolo.

Il Po abbandonò definitivamente Ferrara durante la prima piena importante; un evento epocale per la regione e – in quanto nocivo agli Este – non sgradito al papato. Tant'è vero che nel 1580 Gregorio XIII lo volle immortalato nella Galleria delle carte geografiche dei Musei Vaticani. Il tramonto delle fortune fluviali di Ferrara rimase oggetto di dispute erudite per secoli.

Dobbiamo gli scritti più importanti per ricostruire il danneggiamento sismico del 1570 ai due intellettuali Ligorio e Haadumim. Con l'occasione, Ligorio progettò il primo edificio antisismico di cui si abbia notizia nel mondo occidentale, il secondo ci scrisse sopra (in ebraico) tre libri, poi ristampati a Berlino, Vienna e Vilnius fino al 1866. Vi si trova un'osservazione preziosa per i sismologi: «Per primo, il terremoto muovette la terra [a Ferrara] in direzione est-ovest, subito dopo anche nord-sud», il che è compatibile con onde di tipo SH, seguite da onde di Rayleigh, emesse dalla faglia che abbiamo individuato a nord di Ferrara. Per capirci, guardando verso l'epicentro, le SH si percepiscono come se il pavimento si spostasse a destra e a sinistra; le Rayleigh danno l'impressione di un'onda che ti sollevi e sposti avanti e indietro.

Rimasti inutili gli sforzi riproduttivi del duca – sia pure con tre mogli diverse – complice anche la diserzione del Po e la scomunica dell'erede cadetto, Ferrara torna allo Stato Pontificio nel 1598. Agli ebrei viene imposto il *siman* (contrassegno) e la vita prosegue in tono minore senza il grande fiume. Ma le superstizioni sismiche e antiebraiche sono dure a morire. Circa quattro secoli dopo –

Dalla mappa dei danni al terremoto del 1570

Intensità del terremoto del 17 novembre 1570 (*A*), i dati sono del catalogo DBMI11 dell'INGV, prodotti per il catalogo CFTI4Med. Venticinque valori intermedi sono stati arrotondati all'intero superiore. A destra (*B*), il risultato dell'inversione e le intensità sintetiche prodotte dalla faglia (*rettangolo*), con il meccanismo di rottura riassunto nel diagramma rotondo.
Le intensità, cosiddette macrosismiche, misurano gli effetti del sisma nei diversi luoghi e a diverse distanze. (La magnitudo indica invece l'energia complessiva rilasciata da un terremoto.) I danni iniziano dal VI grado. Si possono usare anche i mezzi gradi (per esempio VI-VII), che molti per convenzione arrotondano al grado superiore. Il ricalcolo della sorgente del 1570 (qui effettuato usando i mezzi gradi) ha dato risultati molto simili con entrambe le convenzioni.

nel 1960 – il Comune di Ferrara ha la necessità di rinforzare la famosa Colonna di Borso D'Este, eretta nel 1452 ai piedi del Palazzo Ducale. Nello smontarla si scopre che nel 1719, per ordine della Chiesa, dentro la colonna era stata inserita una trentina di lapidi cimiteriali ebraiche, fra le quali – sommo sfregio a chi aveva descritto così bene la scossa del 1570 – anche quella della famiglia Haadumim. Del resto, il cimitero ebraico era stato appena smantellato, e «colle lapidi sepolcrali erano state fatte selliciare le Poste de' Cavalli della Stalla Arcivescovile», scrisse Magrini.

Allarme ragionevole

Dagli studi di Athanassios Ganas e altri, delle Università di Atene e di Salonicco, pubblicati nel 2012 dagli «Annals of Geophysics», e dal lavoro di Simone Cesca e colleghi, dell'Università di Potsdam, dell'Helmholtz-Zentrum di Potsdam e dell'INGV, pubblicato sul «Geophysical Journal International» nel 2013, oggi sappiamo che il terremoto dell'Emilia del 20 maggio 2012 ha trasferito nel sottosuolo sforzi cosiddetti «statici» verso ovest-sud-ovest e verso est-sud-est.

Nella prima direzione, questi sforzi aggiuntivi furono in grado di innescare la rottura di una seconda faglia (evidentemente già abbastanza caricata) che produsse la scossa del 29 maggio. Viceversa, fortunatamente, verso est-sud-est non c'erano faglie in procinto di rompersi. Quanto alla faglia del 1570, che abbiamo trovato, non è detto che sia in fase di ricarica. Comunque, essa è a nord-est di quelle di maggio 2012, e non è stata quindi ricaricata in misura apprezzabile dai recenti eventi emiliani. Ma anche questa informazione tranquillizzante – così come la conoscenza della faglia del 1570 – si è resa disponibile solo dopo il giugno 2012. Allora, giustamente le autorità si domandavano se e quanto fosse prudente – per esempio – riprendere il lavoro in capannoni industriali non colpiti gravemente dalle due scosse di maggio. Il comunicato emanato dalla Commissione Grandi Rischi il 7 giugno 2012 è stato quindi, in quel momento, ragionevolmente prudente.

Infine, il terremoto di Ferrara della fine del XVI secolo è a oggi il più antico evento sismico distruttivo di cui, a livello mondiale, sia stato possibile calcolare geometria e meccanismo di rottura tramite un'inversione geofisica automatica. In un certo senso, dobbiamo questo record anche allo sviluppo delle relazioni internazionali dell'Italia del Rinascimento. Senza, per esempio, i rapporti degli ambasciatori, portati a spron battuto nelle corti di mezza Europa, probabilmente non saremmo stati in grado di capire con sufficiente precisione quanti danni avesse prodotto il terremoto e dove. I paesi sismici del Vecchio Mondo, come Italia, Balcani, Medio Oriente, dispongono di archivi storici che possono ancora dare risultati geofisici sorprendenti. ■

PER APPROFONDIRE

Source Inversion of the 1570 Ferrara Earthquake and Definitive Diversion of the Po River (Italy). Sirovich L. e Pettenati F., in «Journal of Geophysical Research Solid Earth», Vol. 120, n. 8, pp. 5747-5763, 28 agosto 2015.

Il punto dell'Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia (INGV) sulla situazione dell'Emilia: **https://ingvterremoti.wordpress.com/2014/05/30/speciale-due-anni-dal-terremoto-in-emilia.**

Riti di calamità: terremoti a Ferrara nel 1570-74. Guidoboni E., in «Quaderni Storici», Vol. 19, n. 55 (1), aprile 1984.

BIOLOGIA

Gli scienziati hanno capito in che modo il veleno iniettato da una piccola vespa trasforma uno scarafaggio nel suo burattino, e in un perfetto pasto vivente per la sua prole

di Christie Wilcox

Neuroscienza degli zombie

Non so se gli scarafaggi sognino, ma se lo fanno immagino che la vespa *Ampulex compressa* sia una protagonista costante dei loro incubi. Queste piccole vespe solitarie tropicali sono di scarso interesse per noi esseri umani; d'altra parte non manipolano la nostra mente per usarci come pasto vivo e consenziente per i loro neonati, come fanno con gli ignari scarafaggi.

È una storia da film horror, letteralmente: *A. compressa* e altre specie simili hanno ispirato le orrende creature in grado di emergere dal petto degli esseri umani nella saga di *Alien*. È una storia semplice quanto grottesca: le femmine controllano la mente degli scarafaggi con cui nutrono la prole, eliminando in loro ogni senso di paura e ogni volontà di sfuggire a quella sorte.

A differenza di quanto vediamo sul grande schermo, però, a trasformare uno scarafaggio sano in uno zombie senza cervello non è un virus incurabile, ma un veleno. E non uno a caso, ma un veleno specifico che agisce come una droga, andando a colpire specificamente il cervello dello scarafaggio.

I cervelli, in sostanza, sono solo neuroni, che si parli di cervelli umani o di insetti. Ci sono potenzialmente milioni di composti velenosi che possono accendere o spegnere i neuroni. Non dovrebbe dunque essere una sorpresa che alcuni veleni abbiano come bersaglio il protettissimo sistema nervoso centrale, compreso il nostro cervello. Certi veleni si fanno strada saltando gli ostacoli fisiologici, partendo da punti di iniezione remoti sparsi in tut-

Adattato da *Venomous: How Earth's Deadliest Creatures Mastered Biochemistry*, di Christie Wilcox, previo accordo con Scientific American/Farrar, Straus and Giroux, LLC (US), Bungeishunju Ltd. (Giappone).

Ampulex compressa, conosciuta anche come vespa gioiello o vespa smeraldo, è un animale spettacolare da un punto di vista estetico ed evolutivo. Il suo veleno è fatto su misura in modo da sabotare il cervello di altri insetti.

Anand Varma/National Geographic

to il corpo e oltre la barriera ematoencefalica, fino a penetrare la mente delle loro vittime. Altri sono iniettati direttamente nel cervello, come nel caso di *A. compressa* e dello scarafaggio suo ospite-zombie.

Come si fa uno zombie

A. compressa è un esempio bello e allo stesso tempo terrificante di come un veleno neurotossico possa causare molto più che una paralisi. La vespa, spesso di dimensioni minime rispetto alla sua vittima, comincia l'attacco dall'alto, per poi tuffarsi e aggrapparsi alla blatta con la bocca mentre inserisce il «pungiglione», un ovopositore modificato, dritto nel centro del corpo, nel torace della preda, tra le prime due paia di zampe. Questo colpo rapido dura solo qualche secondo e i composti tossici agiscono velocemente, paralizzando temporaneamente la blatta in modo che la vespa possa dirigere con maggiore accuratezza la seconda puntura. Con il suo lungo pungiglione, la vespa inocula il veleno psicoattivo in due aree dei gangli, l'equivalente entomologico del cervello.

Il pungiglione è così finemente regolato sulla vittima che la vespa è in grado di percepire dove si trova all'interno del corpo della blatta per iniettare il veleno direttamente in specifiche aree del suo cervello. Il pungiglione riesce a esplorare la testa della blatta sulla base di indizi meccanici e chimici, fino a trovare la strada oltre la guaina che avvolge i gangli (il corrispondente della barriera ematoencefalica per l'insetto) e inoculare il veleno esattamente dove serve. Le due aree cerebrali che la vespa bersaglia sono molto importanti: gli scienziati le hanno rimosse da alcune blatte per vedere in che modo reagiva la vespa e una volta rimosse la vespa continua a cercarle, passando molto tempo col pungiglione inserito in cerca delle aree cerebrali mancanti.

E poi inizia il controllo del cervello. Prima la vittima comincia a pulirsi: appena le zampe anteriori si riprendono dalla paralisi temporanea indotta dalla puntura, la blatta comincia una pulizia ossessiva, che dura quasi un'ora. Gli scienziati hanno capito che questo comportamento è indotto dal veleno perché perforare la testa, causare un generico stress o un contatto con la vespa che non prevede la puntura, non scatena la stessa smania igienica. Questa improvvisa necessità di pulizia può essere anche indotta da una scarica di dopamina nel cervello dell'insetto, per cui pensiamo che il composto simil-dopamina contenuto nel veleno possa essere la causa di questo comportamento germofobico. Se la toelettatura sia un effetto vantaggioso del veleno o un suo effetto collaterale è ancora dibattuto. Alcuni pensano che il comportamento garantisca un pasto pulito e privo di funghi e microbi per la vulnerabile larva di vespa; altri pensano che possa distrarre la blatta per qualche tempo mentre la vespa le prepara la tomba.

La dopamina è uno di quei composti affascinanti che si trovano nel cervello di un ampio spettro di animali, dagli insetti agli esseri umani, e i suoi effetti sono vitali in tutte queste specie. Per quanto riguarda la nostra testa, fa parte per così dire di un sistema mentale di ricompense: le cose piacevoli innescano scariche di dopamina. Dato che ci rende felici, la dopamina può essere meravigliosa, ma è anche correlata a comportamenti di dipendenza e allo «sballo» che proviamo con sostanze illecite come la cocaina. Non abbiamo modo di capire se anche lo scarafaggio provi un picco di euforia da insetto quando il suo cervello è sommerso di dopamina, ma a me piace pensare che lo faccia. (È solo che mi sembra troppo raccapricciante che l'animale non riceva nemmeno una gioia vista la fine orrenda che sta per affrontare.)

Mentre lo scarafaggio si pulisce, la vespa lascia la vittima e si mette in cerca di un luogo adatto. Ha bisogno di un cunicolo buio dove potere lasciare il suo piccolo e lo scarafaggio-zombie che gli donerà, e le ci vuole del tempo per trovare e preparare il posto giusto. Quando torna, circa 30 minuti più tardi, gli effetti del veleno hanno preso il sopravvento: lo scarafaggio ha perso ogni volontà di fuga. In linea di principio, è una condizione temporanea: se si separa uno scarafaggio avvelenato dal suo aspirante assassino prima che la larva possa schiudersi e nutrirsi e diventare pupa, la zombificazione svanisce entro una settimana. Purtroppo per lo scarafaggio avvelenato, è semplicemente troppo tempo. Prima che il suo cervello abbia la possibilità di tornare normale, la giovane vespa ha già fatto il pieno e ucciso il suo ospite.

Le capacità motorie dello scarafaggio rimangono intatte, ma pare che l'insetto non sia semplicemente propenso a usarle. Il veleno quindi non intorpidisce i sensi dell'animale, ma altera il modo in cui il suo cervello li usa. Gli scienziati hanno anche dimostrato che gli stimoli che di solito provocano un'azione evasiva, come toccare le ali o le gambe della blatta, continuano a inviare segnali al cervello dell'animale; solo, non evocano una risposta comportamentale. Questo perché il veleno disattiva certi neuroni in modo che siano meno attivi e reattivi, il che porta lo scarafaggio a perdere improvvisamente la paura e la volontà di essere sepolto e mangiato vivo. Questa attività del veleno richiede tossine che colpiscono i canali del cloro GABA-dipendenti.

Il GABA, o acido gamma amminobutirrico, è uno dei più importanti neurotrasmettitori del cervello di insetti ed esseri umani. Se l'attività dei neuroni è una festa, il GABA è un guastafeste: smorza la capacità di un neurone di accendersi con l'attivazione dei canali del cloro. Quando si aprono, i canali del cloro permettono agli ioni cloruro, negativi, di fluire. Dato che a questi ioni piace

Christie Wilcox è una ricercatrice post-doc nel campo della biologia cellulare e molecolare all'Università delle Hawaii, dove studia il veleno degli animali. È anche blogger e comunicatrice scientifica.

Dopo essersi sviluppata e nutrita all'interno dello scarafaggio suo ospite, la prole di una vespa emerge per avviare di nuovo il macabro ciclo vitale.

IN BREVE

La vespa *Ampulex compressa* dipende da scarafaggi vivi come nutrimento cruciale per le proprie larve neonate.

Per sottomettere gli scarafaggi e indurre in essi il torpore di cui ha bisogno, la vespa ha evoluto una particolare miscela chimica che inietta nel cervello dello scarafaggio per modificarne comportamento e metabolismo.

Anche molte altre specie di vespe usano veleni complessi per parassitare ragni, bruchi e persino larve di altre vespe, trasformandoli talvolta in zombie da guardia per le larve.

Alamy

stare con gli ioni positivi, se i canali sono aperti quando è aperto anche un canale del sodio gli ioni cloruro possono attraversare la membrana quasi allo stesso ritmo degli ioni sodio, in questo modo per gli ioni sodio è più difficile avviare l'effetto domino della segnalazione neuronale. Anche se un neurone riceve il comando di via, il potenziale d'azione si ferma lungo il percorso. Ma il GABA non è un inibitore completo: i canali del cloro non riescono a stare del tutto al passo con quelli del sodio, quindi un forte stimolo può vincere l'effetto frenante. Questo sistema di smorzamento è ciò che la vespa coopta per piegare al suo volere lo scarafaggio. Il veleno è ricco di GABA e di altri due composti che attivano gli stessi recettori cloruro: gamma alanina e taurina. Questi composti agiscono anche in modo da prevenire la ricaptazione del GABA da parte dei neuroni, prolungandone l'effetto.

Pur potendo ridurre l'attività cerebrale che farebbe fuggire la preda, ciò che questi composti velenosi non possono fare è arrivare da soli fino alle parti giuste del cervello dello scarafaggio. Per questo la vespa deve iniettarli direttamente nel gangli dell'animale. Per sua fortuna, in un pratico capriccio della natura, lo stesso veleno che zombifica il cervello dello scarafaggio riesce magicamente anche a indurre la paralisi transitoria necessaria per l'iniezione intracranica. GABA, gamma alanina e taurina chiudono temporaneamente i motoneuroni, per cui alla vespa occorre un solo veleno per portare a termine due compiti molto diversi.

Ora che la sua preda è calma e a riposo, la vespa può rifocillarsi rompendo le antenne dello scarafaggio e bevendo un po' del suo sangue dolce e nutriente. Quindi porta la vittima alla sua ultima dimora, usando ciò che resta di un'antenna come un cavaliere usa le redini. Una volta dentro la tana, la vespa attacca un uovo a una zampa della preda, poi sigilla la sua prole e lo scarafaggio.

Pasto fresco

Come se non bastasse la manipolazione mentale, il veleno della vespa ha un ultimo trucchetto. Mentre lo scarafaggio attende il suo inevitabile destino, il veleno rallenta il metabolismo dell'insetto per farlo vivere abbastanza a lungo da essere divorato ancora fresco. Un modo in cui il metabolismo può essere misurato è sulla base di quanto ossigeno si consuma nel tempo, dato che tutti gli animali (noi compresi) usano ossigeno per generare energia da cibo o depositi di grasso. Gli scienziati hanno scoperto che il consumo di ossigeno negli scarafaggi che sono stati punti è più basso che nei loro amici sani. Si pensava che potesse essere l'effetto del ridotto movimento delle vittime consenzienti, ma anche quando si induce la paralisi con droghe, o troncando i neuroni, gli scarafaggi punti vivono più a lungo. La chiave di questa sopravvivenza prolungata sembra essere l'idratazione. Non è noto in che modo il veleno mantenga idratato uno scarafaggio, ma fa sì che quando la larva di vespa emerge dall'uovo il suo pasto sia pronto da mangiare. E poco tempo dopo una nuova vespa viene fuori dalla tana, lasciandosi dietro la carcassa dello scarafaggio.

Quello di *A. compressa* è solo un esempio di veleno neurotossico portato all'ennesima potenza. Ci sono più di 130 specie nello stesso genere di vespa, inclusa una, descritta di recente, di nome *A. dementor* (il nome dementor è un riferimento ai Dissennatori, le guardie succhia-anime della prigione magica di Azkaban in Harry Potter). Il genere *Ampulex* appartiene a un gruppo di vespe grande e diversificato, che include almeno qualche centinaio di migliaia di specie note per forme molto spinte di manipolazione mentale. Tutte hanno un macabro ciclo vitale: da adulte si nutrono come le altre vespe e le api, ma da larve devono nutrirsi di altri animali. Non sono né del tutto indipendenti, né del tutto parassite: sono simil-parassite o, come dicono gli scienziati, parassitoidi.

Gli scarafaggi non sono gli unici bersagli: ci sono vespe parassitoidi che depongono le uova dentro ragni, bruchi e formiche. La vespa *Agriotypus*, tipica delle zone temperate dell'emisfero boreale, si immerge sott'acqua per attaccare le uova alle larve di tricotteri, e può rimanere immersa fino a 15 minuti. Le impavide *Lasiochalcidia*, presenti in Europa e in Africa, si gettano nelle spaventose fauci di un formicaleone, le spalancano e infilano le uova nella gola dell'insetto. Ci sono anche vespe chiamate iperparassitoidi che parassitizzano altre vespe, per esempio quelle del genere *Lysibia*, in Europa e in Asia, che fiutano i bruchi parassitati da vespe parassitoidi del genere *Cotesia* e depongono le uova nelle larve di vespa appena impupate. In alcuni casi, diverse specie di vespa si parassitizzano a vicenda, in una matrioska di interazioni parassitarie.

E per garantire che la prole arrivi sana e salva dallo stadio larvale alla vita adulta spesso queste vespe ricavano più del semplice pasto dai loro ospiti. Una specie trasforma il bruco ospite in una guardia del corpo non morta che difende le giovani pupe che si nutrono del suo corpo. La larva di un'altra specie costringe il ragno suo ospite a tessere una tela deforme ma resistente, con cui la vespa proteggerà il suo bozzolo, poco prima di uccidere l'aracnide.

Anche se le vespe di questa insolita famiglia hanno perfezionato l'arte del controllo della mente, ci sono altre specie velenose le cui tossine alterano gli stati mentali. Esistono persino specie i cui composti neurotossici attraversano la nostra barriera ematoencefalica, una prodezza in cui nessun veleno di vespa è ancora riuscito. Ma, a differenza degli scarafaggi, noi *Homo sapiens* abbiamo una strana affinità per le sostanze che alterano la mente. Se gli scarafaggi scappano da chi scherza con il loro cervello, certe persone invece sono disposte a pagare centinaia di dollari per una dose di veleno che dia loro un'esperienza simile. ■

PER APPROFONDIRE

A Wasp Manipulates Neuronal Activity in the Sub-Esophageal Ganglion to Decrease the Drive for Walking in Its Cockroach Prey. Gal R. e Libersat F., in «PLoS ONE», Vol. 5, n. 4, articolo n. e10019, 7 aprile 2010.

The Soul-Sucking Wasp by Popular Acclaim – Museum Visitor Participation in Biodiversity Discovery and Taxonomy. Ohl M. e altri, in «PLoS ONE», Vol. 9, n. 4, articolo n. e95068, 22 aprile 2014.

The Role of the Cerebral Ganglia in the Venom-Induced Behavioral Manipulation of Cockroaches Stung by the Parasitoid Jewel Wasp. Kaiser M. e Libersat F., in «Journal of Experimental Biology», Vol. 218, n. 7, pp. 1022-1027, 1° aprile 2015.

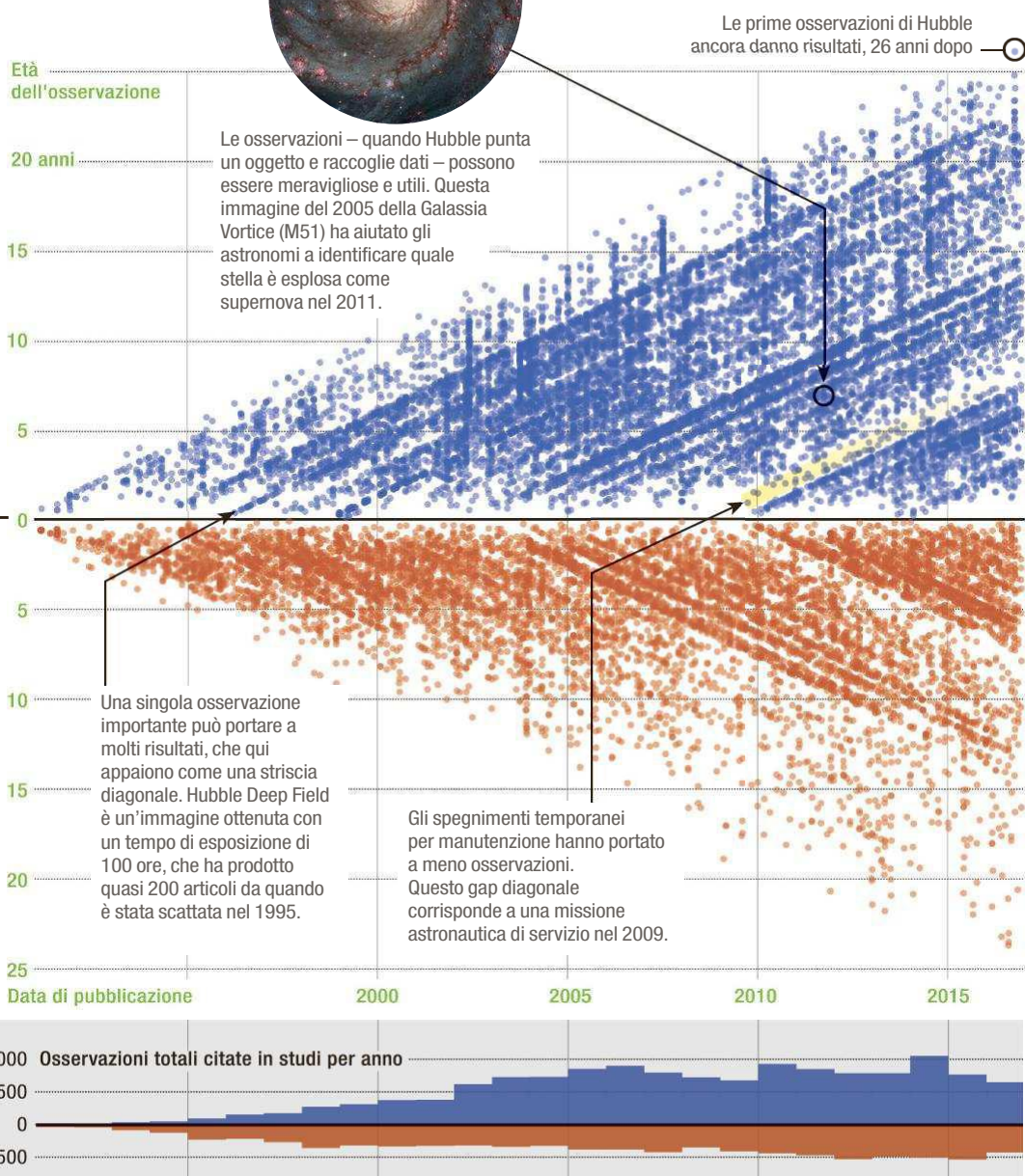
Visitatori nel cervello. Sapolsky R., in «Le Scienze» n. 416, aprile 2003.

Lunga vita a Hubble

I dati del telescopio porteranno a scoperte anche dopo la fine delle osservazioni

Con un po' di fortuna, il telescopio spaziale Hubble porterà a nuove impressionanti immagini del cosmo ancora per anni. Ma poiché la NASA non effettua più la manutenzione del telescopio ci si aspetta che in qualche momento dopo il 2020 Hubble smetterà di essere operativo. Tuttavia questo non significa che le scoperte del telescopio spaziale si fermeranno. La NASA custodisce un archivio di dati raccolti durante la vita operativa di Hubble, iniziata nel 1991, e li rende disponibili al pubblico gratuitamente.

L'archivio ha già portato a scoperte come nebulose e galassie distanti. «L'eredità è un tesoro di dati che possono essere analizzati in futuro», dice Arfon Smith, che dirige una nuova iniziativa che riguarda i dati di Hubble allo Space Telescope Science Institute. «I dati sono incredibilmente preziosi e ancora poco usati». L'archivio è un testamento al valore duraturo della grande ricerca di base: i dati possono ripagare in modi che gli astronomi non possono ancora immaginare.

Katie Peek

Grafica di Katie Peek; fonte: Barbara A. Mikulski Archive for Space Telescopes, Space Telescope Science Institute (*dati*); Hubble Heritage Team (STScI/AURA) (*galassia*)

di Paolo Attivissimo
Giornalista informatico e studioso
della disinformazione nei media

Bagliori nel buio

Osservazioni multiple dei misteriosi TLE ne hanno confermato l'esistenza reale

I piloti degli aerei di linea e militari hanno sostenuto per anni di avvistare, durante i voli notturni, misteriosi bagliori colorati che si stagliano fugacemente nel cielo, a quote ben superiori a quelle raggiunte dai velivoli normali. I loro racconti sono affascinanti, ma le prove oggettive scarseggiano: i fenomeni descritti sono troppo rapidi e sfuggenti per essere fotografati. I ricercatori etichettano il mistero con un asettico acronimo di tre lettere, ma stavolta l'ufologia non c'entra. L'acronimo in questione è infatti TLE, che sta per *Transient Luminous Events*: eventi luminosi transitori.

La prima documentazione visiva della loro esistenza risale al 1990, quando viene pubblicata su «Science» una sgranatissima immagine televisiva in bianco e nero di un bagliore situato al di sopra di un temporale e diretto verso lo spazio. Nonostante la scarsa qualità, questa prima prova sposta il fenomeno dal mito alla realtà e scatena l'interesse della scienza. Arrivano ben presto altre conferme visive di questi bagliori, sempre associati ai fulmini temporaleschi. Iniziano le misurazioni, anche tramite satelliti lanciati appositamente, e si scopre che questi lampi avvengono ad altissima quota (fra 40 e 80 chilometri dal suolo, al confine con lo spazio), sono larghi decine di chilometri e durano al massimo qualche decina di millisecondi.

Da allora, la ricerca sui TLE ha fatto grandi progressi, definendo categorie di bagliori con nomi pittoreschi come *troll*, *sprite* ed *elf* (folletti), e da poco sono state rese pubbliche le eccezionali immagini a colori scattate dall'astronauta danese dell'Agenzia spaziale europea (ESA) Andreas Mogensen a bordo della Stazione spaziale internazionale nel 2015. Un video a colori in alta definizione, ripreso mentre la stazione sorvolava il golfo del Bengala a 400 chilometri di quota, mostra immensi lampi rossi e azzurri che si scagliano verticalmente verso l'alto dalla sommità delle nubi temporalesche, sotto forma di getti pulsanti, raggiungendo la quota di 40 chilometri.

Queste grandi scariche elettriche si verificano in una parte poco conosciuta della nostra atmosfera, nella terra di nessuno fra le quote raggiungibili dagli aerei e dai palloni aerostatici più sofisticati e le orbite dei satelliti; capirne le dinamiche significa comprendere meglio come l'atmosfera ci protegge dalle radiazioni, secondo l'ESA e gli autori della ricerca pubblicata insieme alle immagini di Mogensen su «Geophysical Research Letters».

Le immagini di questi getti azzurri, che danzano sospesi sopra le nubi illuminate dall'interno dai fulmini che corrono verso il suolo, sono talmente inconsuete da sembrare finte, e il fenomeno era considerato con scetticismo fino a un paio di decenni fa: viene spontaneo chiedersi perché la scienza abbia cambiato idea così repentinamente in questo caso, ma non faccia lo stesso con altre immagini e altri fenomeni altrettanto sfuggenti e intriganti, come gli UFO.

La risposta è una lezione importante di metodo scientifico: le testimonianze, da sole, non bastano. Neanche se provengono da persone qualificate come lo sono i piloti. Sono necessari registrazioni e dati strumentali raccolti professionalmente, che provengano da fonti che siano insospettabili e soprattutto che documentino un singolo episodio tramite osservazioni multiple e indipendenti.

Questo fotogramma estratto dal video girato da Mogensen mostra chiaramente il fenomeno dei grandi lampi azzurri al di sopra delle nubi temporalesche.

ESA/NASA

Mentre Mogensen riprendeva le immagini dallo spazio, infatti, i satelliti Meteosat e palloni sonda acquisivano dati su struttura e temperature delle nubi da cui scaturivano i getti. Il confronto fra questa raccolta coordinata e meticolosa di dati e le immagini singole e confuse degli avvistamenti ufologici spiega perché questo fenomeno nuovo è stato accettato dalla scienza: se le prove arrivano e sono inoppugnabili, alla fine il mistero, per quanto apparentemente impossibile, diventa un fatto.

di Beatrice Mautino
Biotecnologa, giornalista e comunicatrice scientifica. Tra i suoi libri più recenti, l'e-book *Stamina. Una storia sbagliata* (2014) e *Contro natura*, con Dario Bressanini (Rizzoli, 2015)

Neri, biondi o bianchi?

Il colore dei capelli dipende da cellule che producono due forme di melanina

Mi ricordo il giorno in cui l'ho visto per la prima volta. Ero davanti allo specchio, e mi stavo preparando per uscire quando un raggio di Sole è entrato dalla finestra e l'ha illuminato. Il mio primo capello bianco era lì a mostrarmi lo scorrere inesorabile del tempo. E adesso che cosa faccio? Lo stacco o lo lascio lì? Dicono che per ogni capello bianco staccato ne spuntano altri sette. Ma io sono scettica e pure sperimentale. Dai, va bene, lo stacco e non ci penso più.

La biologia della colorazione dei capelli è affascinante. La protagonista è la melanina, un polimero abbastanza grande, insolubile in acqua, che si presenta in due forme: l'eumelanina, scura, con colori che vanno dal marrone al nero e la feomelanina, chiara, con colorazioni dal giallo al rosso. Queste due forme sono prodotte, a partire dall'amminoacido tirosina, da particolari cellule presenti nel bulbo pilifero, i melanociti, che le «iniettano» nel capello man mano che cresce, in proporzioni che sono regolate geneticamente e che regolano a loro volta la colorazione dei capelli. Le persone con i capelli chiari avranno un eccesso di feomelanina, quelle con i capelli scuri, invece, un eccesso di eumelanina. La prima cosa che capiamo, quindi, è che il colore è fisicamente presente nelle fibre dei capelli, ma il «colorificio» è racchiuso all'interno del cuoio capelluto.

Questo ci permette di capire, per esempio, perché i capelli si schiariscono col Sole, ma poi ritornano al colore originale. Sembrerà strano, ma la dinamica è la stessa che regola l'abbronzatura della pelle. Com'è possibile che l'azione del Sole in un caso scurisca la pelle e nell'altro, invece, schiarisca i capelli? In realtà è molto più semplice di quello che sembra: l'azione dei raggi ultravioletti (UV) nei confronti della melanina è distruttiva. Che si tratti di melanina presente nella pelle o nei capelli, il Sole la distrugge. Nella pelle, che è un organo vivo, questa azione genera una catena di segnali molecolari che spingono i melanociti a produrre altra melanina per creare una barriera protettiva. I capelli, invece, sono fibre «morte», e quindi la distruzione della melanina si manifesta semplicemente con uno schiarimento, senza che questo scateni nessuna reazione da parte dei melanociti che continueranno il loro lavoro di produzione come prima.

Almeno, fino a quando non decideranno di smettere per sempre. Infatti, i responsabili dei capelli bianchi sono loro, i melanociti, che a un certo punto, non si sa bene perché, smettono di lavorare. O, meglio, si sa che c'è una componente genetica, ma le dinamiche non sono ancora state chiarite del tutto.

Uno studio dello scorso anno di un gruppo di ricerca dello University College London pubblicato su «Nature Communications», ha fatto emergere un probabile colpevole. Si chiama *IRF4* ed è un gene che regola l'espressione di un enzima chiave nella sintesi di melanina oltre a garantire il mantenimento in buona salute dei melanociti. Siamo solo all'inizio e per completare il quadro mancano ancora molti tasselli, ma uno degli autori dello studio, Kaustubh Adhikari, ha dichiarato che la loro scoperta permetterà di «sviluppare un farmaco che agisca sul capello dall'interno, in modo che sia già del colore desiderato quando spunta dallo scalpo». E siamo sicuri che il magico mondo del marketing della cosmetica saprà raccogliere questa sfida mettendo sul mercato test genetici e, perché no, promesse di cure miracolose.

Per ragioni non del tutto chiarite, ma in cui ha un ruolo la genetica, a un certo punto della vita i melanociti smettono di produrre melanina e i capelli diventano bianchi.

Per quel che mi riguarda, a distanza di tempo da quel mio primo capello bianco, posso confermarvi sperimentalmente che quella dei sette capelli bianchi che spuntano per ogni capello bianco strappato è una leggenda. Tuttavia, il proposito di non pensarci è andato vano, perché al posto di quel malefico capello bianco ne è spuntato un altro. Bianco pure lui.

Ekaterina79/istockphoto

di Dario Bressanini
chimico, divulgatore interessato all'esplorazione scientifica del cibo.
Autore di *Pane e Bugie*, *OGM tra leggende e realtà* e *Le bugie nel carrello.*

Biscotti senza

Le alternative «dietetiche» allo zucchero non sempre lo sono veramente

Avete notato che ormai al supermercato è più facile trovare biscotti e frollini «senza qualcosa» invece che confezioni che mettano in bella vista che cosa contengono? Gli ingredienti classici sono farina di frumento, zucchero, burro e uova ma sempre più spesso il marketing sfrutta la diffidenza di una parte del pubblico verso questi ingredienti per proporre versioni che vengono percepite come «più salutari» o «dietetiche», anche se non è detto che lo siano veramente. Sostituire completamente questi ingredienti lasciando inalterate le proprietà organolettiche è però quasi impossibile.

Se burro e uova si possono parzialmente sostituire con altri grassi e sostanze leganti, a scapito tuttavia del sapore, l'ingrediente più difficile da rimpiazzare è lo zucchero. Il saccarosio – il suo nome chimico– svolge principalmente la funzione di dolcificare. Ma una proprietà altrettanto importante in pasticceria è conferire la struttura desiderata ai prodotti da forno, una volta evaporata parzialmente o totalmente l'acqua. Il saccarosio cristallizzato agisce da sostegno al resto degli ingredienti: pensate alle meringhe. Aggiunto in un impasto, lo zucchero riduce la formazione del glutine.

Ecco perché è così importante la quantità di zucchero aggiunto all'impasto di un frollino: questo deve essere friabile, legato debolmente dalle proteine dell'uovo e con poco glutine. Riducendo troppo lo zucchero in una pasta frolla si ottiene quindi un prodotto più duro. È il motivo principale per cui non è possibile sostituire del tutto lo zucchero con i vari dolcificanti non calorici disponibili sul mercato: dall'aspartame all'estratto di Stevia alla saccarina al sucralosio. Queste sostanze hanno un potere dolcificante centinaia o addirittura migliaia di volte superiore a quello del saccarosio e quindi sarebbero buone opzioni per ridurre le calorie di un biscotto. Purtroppo però non sono in grado di svolgere la funzione strutturale che ha lo zucchero. Ecco perché queste sostanze sono usate principalmente nelle bevande, in cui il potere dolcificante è l'unica proprietà sfruttata.

Per ovviare a questo problema alcuni produttori usano molecole chiamate polioli, come maltitolo, sorbitolo, xilitolo e così via, al posto del saccarosio. Dal punto di vista chimico sono sostanze simili agli zuccheri, per cui ne conservano in parte il potere dolcificante mentre forniscono allo stesso tempo un apporto calorico dimezzato, a parità di peso. I polioli però hanno lo svantaggio di essere lassativi per cui il loro impiego privilegiato è in quei prodotti da consumare in piccole quantità: dalle gomme da masticare al cioccolato.

Considerate le difficoltà di sostituzione, a volte si segue un artificio che comunque prevede l'uso di zuccheri, forniti però in una forma diversa, in modo che non compaiano direttamente nella lista degli ingredienti. Molto sfruttati sono per esempio il succo di mela concentrato o il succo d'uva concentrato. Usati principalmente nella preparazione di confetture e marmellate, contenendo grandi quantità di zuccheri, principalmente glucosio e fruttosio, questi succhi non portano alcun vantaggio dal punto di vista dietetico rispetto all'uso del saccarosio. Nella preparazione dei biscotti a volte lo zucchero è sostituito con il miele, che gode di una immagine positiva presso i consumatori, ma anche in questo caso si tratta essenzialmente di una miscela concentrata di glucosio e fruttosio, senza alcun vantaggio di tipo dietetico o salutistico. Stesso discorso per zuccheri meno raffinati come il mascobado o muscovado che contiene comunque più del 90 per cento di zuccheri semplici e, a parte un buon aroma, non ha differenze nutrizionali sostanziali rispetto allo zucchero bianco.

Insomma, se volete ridurre le calorie forse il modo migliore è mangiare meno biscotti, ma buoni.

Pochi, ma buoni. Nonostante le varie opzioni con cui sostituire gli zuccheri nei biscotti, forse il modo migliore per ridurre il loro apporto calorico è mangiarne di meno.

elenaburn/iStockphoto

di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

Psicologia cognitiva alla posta

Il tabellone elettronico a cifre rosse aggiorna una nuova riga, sottolineando l'evento con il gracchiare di un cicalino. Il giovanotto con il cappello verde scatta verso uno degli sportelli con i riflessi e la passione di un centometrista. Tutti gli altri restano fermi, ricontrollando il bigliettino che tengono fra le mani. Lo fa anche Doc, anche se ricorda perfettamente il suo numero. Prova a scambiare uno sguardo con Alice, che però resta fissa a guardare fuori dalla vetrata; infine si rivolge a Rudy, che invece è placidamente seduto a osservare la varia umanità unita dall'attesa.

«Sempre convinto che sia stata una buona idea, GC? Te lo abbiamo detto e ripetuto che esistono decine di modi più semplici e comodi per pagare un bollettino postale; e senza bisogno di fare la coda.»

«Piantala di lamentarti, Piotr – replica Rudy – lo so benissimo che si può fare tutto da casa, via rete. Ma almeno una volta ogni tanto fa bene immergersi nella realtà reale, invece di delegare tutto alla realtà virtuale.»

Alice sbuffa: «Sarà... ma tra le tante attività possibili che sono indubbiamente più gratificanti se fatte dal vivo anziché via Web, proprio la coda alle poste dovevi scegliere?»

«E perché no? È uno dei posti migliori possibili, se si vuole tornare a osservare l'umanità vera; decine di facce, espressioni, modi di vestire, di parlare...»

«Anche di approfittarsi del prossimo, se è per questo: sono già due le persone che, con buona pace del tabellone e della fila unica, sono riuscite a saltare la coda», sottolinea Alice.

«Distinguerei i due casi, però» dice Piotr: «Quella signora elegante che sta raccontando di aver fatto confusione con le prenotazioni e racconta della terribile urgenza che l'assilla è evidentemente in cattiva fede; ma il vecchietto malandato che un quarto d'ora fa si è presentato allo sportello dei pacchi per ritirare la pensione era certamente solo disorientato... gli impiegati hanno fatto bene a dargli retta, a mio parere.»

«Già», approva Rudy: «C'è una bella differenza tra un errore e una truffa. Un conto è mentire sapendo di mentire, un conto è farlo convinti di dire la verità. A volte i linguaggi non sono sufficientemente evoluti, per trasferire importanti differenze di contenuto semantico.»

Il tabellone si aggiorna; a scattare verso lo sportello appena liberatosi ora è una signorina con un fascio di bollettini.

«Forse non è solo un problema di linguaggio», osserva Alice: «Tanto per dire, quel famoso "problema giuridico" io non ho ancora capito come andrebbe risolto...»

«A quale ti riferisci, Treccia?»

«Lo so io – interviene Rudy – si riferisce a quello dei tre tizi nel deserto, con due che tentano indipendentemente l'uno dall'altro di ammazzare il terzo. Uno gli avvelena la borraccia, l'altro gliela buca: la povera vittima muore di sete, ma al processo l'avvocato del tizio che ha bucato la borraccia sostiene che il suo assistito non ha fatto altro che evitare che il poveretto non bevesse il veleno: l'altro avvocato invece sostiene che il suo cliente avrà pure avvelenato l'acqua, ma tanto la vittima quel veleno non l'ha mai bevuto...»

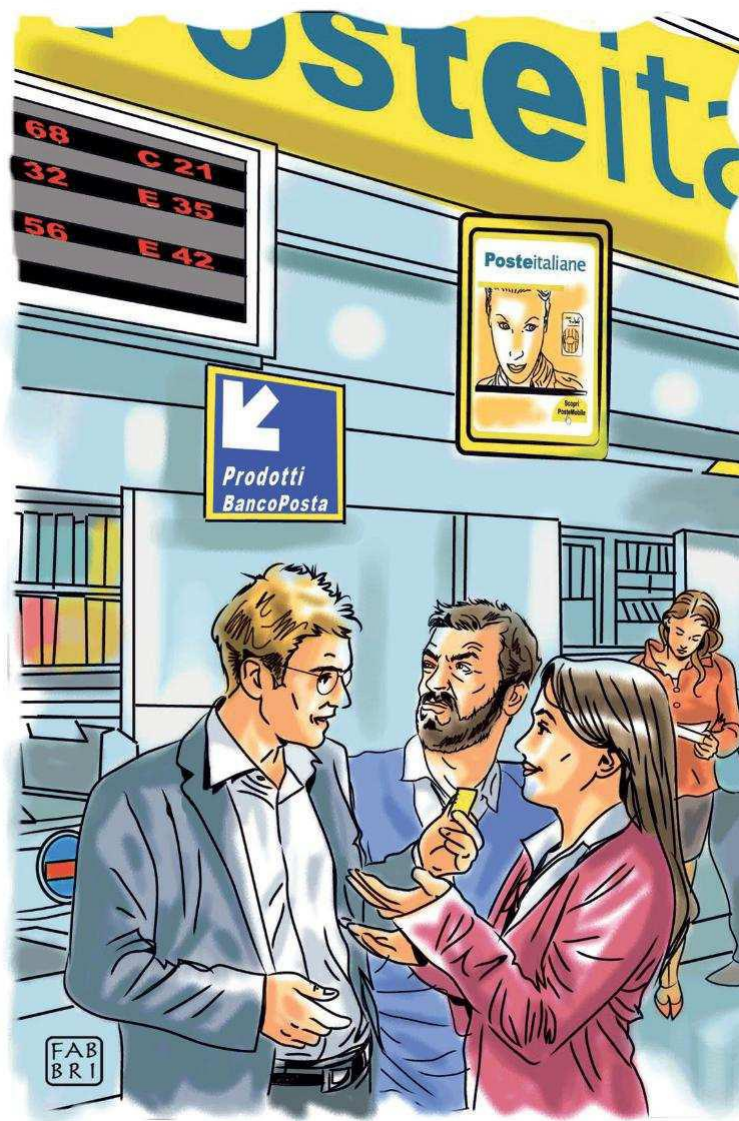



Illustrazione di Stefano Fabbri

«Ah, sì... e così, il poveretto è stato certo assassinato, ma non si bene da chi. E che soluzione ha?»

«Non ne ho idea», risponde Rudy; «forse ci sarà una soluzione giuridica, ma di soluzioni logiche non ne vedo. Però non mi sembra tanto calzante come esempio: al limite, mi pare più appropriato considerare i concetti di "conoscenza comune" e "conoscenza mutua", che hanno divertenti conseguenze logiche.»

«Logica? Uh... la sopporto appena di più del calcolo delle probabilità», sbuffa Alice; «ma adesso spiegaci che cosa sarebbero queste due conoscenze diverse, che tanto dovremo restare in coda ancora un bel po'.»

La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve sul numero di aprile e in forma estesa sul nostro sito: www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.

Per ingannare l'attesa durante la fila in un affollato ufficio postale, Rudy elabora un problema ispirato a un gioco logico

IL PROBLEMA DI FEBBRAIO

Il problema del mese scorso riguardava il taglio di un cubo di lato 3 in 27 cubetti di lato 1. La prima domanda era se fosse possibile, risistemando i pezzi dopo ogni taglio, riuscire a scendere al di sotto dei 6 tagli «naturali» che si possono fare semplicemente trisecando ogni faccia per piani paralleli agli assi. La risposta è «no», e lo si vede facilmente considerando il cubetto centrale dei 27: è un cubetto che non ha nessuna faccia in comune con il cubo originario, tutte e sei devono necessariamente essere create da tagli indipendenti.
La generalizzazione del problema in cui i cubetti unitari si devono ottenere da parallelepipedi a dimensioni intere si può affrontare considerando il taglio su una sola dimensione (per simmetria con le altre). Se lo spigolo considerato è una potenza di 2 (sia 2^n), con bisezioni e risistemazioni si otterranno lunghezze unitarie dopo n tagli. Se non è una potenza di 2, posso considerare un insieme di «cubetti virtuali» sino a portare il lato ad una potenza di 2, e agire di conseguenza. Operando nello stesso modo con gli altri spigoli, si ottiene che per ridurre a cubetti un parallelepipedo A x B x C sono necessari: $T = \sup(\log_2 A) + \sup(\log_2 B) + \sup(\log_2 C)$, dove «sup» rappresenta l'arrotondamento per eccesso della funzione tra parentesi.

«Beh... possiamo ipotizzare che tutte le persone presenti in quest'ufficio postale sappiano che Roma è la capitale d'Italia. Se l'ipotesi è giusta, possiamo dire che questa nozione è un pezzo di "conoscenza mutua". Ma noi in realtà non sappiamo se davvero tutti sanno che Roma è la capitale d'Italia. Per contro, noi tre sappiamo bene non solo che Roma è la capitale d'Italia, ma anche che ognuno di noi tre sa che gli altri due lo sanno. Non solo, ma "noi tre sappiamo che tutti e tre sappiamo che Roma è la capitale d'Italia", e così via in annidamenti all'infinito. Questa è conoscenza comune.»

«Fantastico. Mi sembra un bel sistema per complicare qualcosa di semplice», commenta Piotr: «Ennesimo capolavoro delle scienze cognitive, direi.»

«Io riserverei a quelle scienze un maggiore rispetto, Doc: sono davvero due conoscenze diverse, e il passaggio dall'una all'altra è un'informazione significativa, in qualche caso.»

«È certo conoscenza comune che resteremo qui fino a mettere radici», dice Alice: «GC, io senza esempi capisco poco, e quello di Roma capitale non mi pare sufficiente per capire quale sia questo "*quid*" di importante informazione in più. Sei certamente in grado di fare un esempio migliore, vero?»

« Certo, ma guarda che sono molti i problemi di logica ricreativa che si basano proprio su questa "promozione" da conoscenza mutua a conoscenza comune. Anzi, piuttosto che un esempio, è proprio con un problemino che tutto si chiarirà. Adesso dirò un numero intero e positivo a ciascuno di voi, senza che l'altro lo senta: i due numeri saranno ovviamente diversi tra loro, ma consecutivi. Poi, mentre voi pensate, approfittando di quello splendido orologio a muro fornito dalle poste nazionali, io vi segnalerò con un "*bong*" ogni scoccare di minuto; quando uno di voi avrà capito quale siano i due numeri, potrà annunciarli subito dopo il "bong". Naturalmente non potete parlare tra voi: tenete presente che il gioco non è tanto una gara fra voi due, quanto fra voi due alleati contro di me. Diciamo che se uno di voi sbaglia la risposta, mi pagate un pranzo sopraffino al ristorante pieno di stelle dall'altra parte della strada, e se invece indovinate sarò io pagare il conto della pizzeria per tutti e tre. Tutto chiaro?»

«Chiaro? Beh, sì... – annuisce Alice – soprattutto la tua maniera "equa" di fare scommesse. Tuttavia credo di cominciare a capire sia la strategia necessaria per vincere, sia la differenza tra le due "conoscenze".»

«Anch'io, forse...» conferma Piotr: «Tanto vale giocare, allora, no? Su, GC, bisbigliaci questi numeri e comincia a rintoccare da bravo orologio.»

Segue la strana scena in cui, in un affollato ufficio postale del centro, si vedono tre persone ferme e silenziose, due delle quali molto concentrate e la terza che di tanto in tanto emette un sonoro e baritonale "bong". Scena peraltro seguita dall'ancor più strano tafferuglio che si anima a un certo punto, quando uno dei tre comincia a sbraitare e a inveire contro gli altri agitando il bigliettino di prenotazione, essendosi accorto di aver distrattamente perso il turno quando il tabellone elettronico lo chiamava allo sportello.

Uguaglianze rivoluzionarie

Le 17 equazioni che hanno cambiato il mondo
di Ian Stewart
Einaudi, Torino, 2017, pp. 430 (euro 35,00)

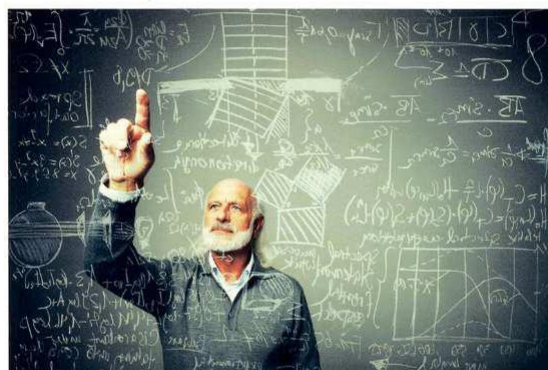
Il compito della scienza potrebbe definirsi come quello di spiegare le relazioni tra oggetti, tra le entità del mondo in cui viviamo. Le relazioni possibili sono molte, forse infinite, ed è per questo che è difficile raggiungere un grado soddisfacente di conoscenza: gran parte delle discipline scientifiche devono accontentarsi di definire al meglio possibile alcune correlazioni che restano comunque viziate da un certo grado di approssimazione. In altre parole, la maggior parte delle scienze sono costrette a registrare relazioni incomplete; sulla base di esperienze ripetute riescono certo a definire dei protocolli ottimali, ma con una percentuale sensibile di eccezioni.

Le cosiddette «scienze dure» sono quelle che tendono a prendere in considerazione quasi esclusivamente la relazione più semplice, ma certamente più definitiva, perché priva di approssimazioni e di eccezioni: l'uguaglianza. L'informazione portata dall'unica relazione totalmente priva di ambiguità è così preziosa che richiede il massimo rigore possibile: quello matematico, che riesce a riassumere la conoscenza raggiunta in forma di equazione. Il fatto che le equazioni posseggano spesso anche un profondo valore estetico è forse solo accidentale, ma resta comunque stupefacente; e certo ha contribuito a invogliare Ian Stewart a scrivere questo libro.

Matematico e gran divulgatore, Stewart decide di sfidare la più famosa ammonizione dell'editoria scientifica, cioè quella che paventa il dimezzamento del numero delle copie vendute per ogni equazione stampata, e dedica esplicitamente i 17 capitoli del suo ultimo lavoro a una selezione tra le equazioni più significative della storia.

Tutti i capitoli si aprono con l'equazione protagonista scritta in caratteri di scatola, molto grandi e chiari, con ogni simbolo spiegato a margine; segue una sorta di «scheda tecnica» che riepiloga velocemente significato, importanza e applicazioni dell'equazione. Nelle pagine successive l'autore racconta con dovizia di particolari storia, personaggi, evoluzione e conseguenze dell'equazione stessa. Essendo il libro un volume di dimensioni rispettabili, ogni capitolo si trasforma di fatto in un piacevole «saggio breve» sulla formula protagonista.

Le equazioni prese in considerazione sono narrate in ordine cronologico di scoperta, senza separazione tra quelle di natura puramente matematica e quelle che si fanno invece carico di descrivere il mondo. Così si ritrovano il teorema di Pitagora, la formula dei logaritmi di Napier, il calcolo infinitesimale di Leibniz e Newton, i numeri immaginari nati in Italia, la formula euleriana dei poliedri, la distribuzione normale di Gauss, le trasformate di Fourier e l'equazione logistica, ovvero argomenti essenzialmente matematici, frammisti a quelli propriamente fisici, come la gravitazione universale newtoniana, l'aerodinamica di Navier-Stokes, le leggi di Maxwell sull'elettromagnetismo, il secondo principio della termodinamica (a voler essere pignoli, unico elemento che

Ian Stewart
Le 17 equazioni che hanno cambiato il mondo

Einaudi

non asseconda il titolo, visto che si tratta di una disequazione), la relatività di Einstein, l'equazione classica delle onde e la sua succedanea quantistica di Erwin Schrödinger.

A completare il quadro concorrono le equazioni di due discipline che, al pari della fisica, fanno sempre più uso del rigore matematico: la teoria dell'informazione, rappresentata dalla cruciale equazione di Claude Shannon, così invisibilmente presente e operante in tutti i dispositivi di comunicazione che utilizziamo continuamente; e l'economia, richiamata dalla relazione di Black-Scholes. Ed è forse proprio quest'ultima quella che meglio fa percepire la temeraria affermazione del titolo sul potere delle equazioni di cambiare il mondo. Se, per sua stessa natura, una formula matematica può leggersi come lontana dal mondo e dalla quotidianità umana; se una relazione fisica ha una validità così universale che può rubricare i suoi effetti sull'umanità come effetti marginali di qualcosa di ben più grandioso, il riconoscere nell'uso (e abuso) di derivate parziali del secondo ordine la cagione ultima della crisi economica che da un decennio ha cambiato il nostro stile di vita è quantomeno sorprendente.

Piero Fabbri

Questioni pratiche per l'utilità della bioetica

Bioetica per perplessi
di Gilberto Corbellini e Chiara Lalli
Mondadori, Milano, 2017,
pp. 432 (euro 32,00)

Troppo spesso malamente intesa solo come la regolazione restrittiva della libertà altrui in base a pregiudizi personali (vestiti da filosofie, religioni, ideologie politiche), la bioetica può invece rispondere a un altro pregiudizio: la necessità di «un approccio naturalistico o scientifico al modo di funzionare della moralità». Si tratta quindi di osservare le possibilità offerte dalle tecnologie senza partire dal presupposto che la scienza sia intrinsecamente contraria a una presunta essenza dell'umano, ma che sia invece fondamentale per consentire decisioni autonome e informate da parte dei cittadini. Il libro di Corbellini, storico della medicina e della bioetica, e di Lalli, bioeticista, quindi non si avvita intorno a sottili distinzioni filosofiche, ma piuttosto esamina una serie di questioni bioetiche dibattute nelle nostre società evidenziando quali siano i risultati ottenuti dalla ricerca nei diversi campi.
L'inquadramento è quello evoluzionista: noi siamo stati selezionati in base a vantaggi adattativi, e i nostri comportamenti e le nostre credenze sono il prodotto della storia evolutiva di *Homo sapiens*, dunque non sono orientati alla ricerca della verità, ma a garantire riproduzione degli individui e sopravvivenza della specie. Tenendo presente ciò, i capitoli (tra cui uno storico che traccia l'origine della bioetica) indicano ai perplessi evocati nel titolo le fallacie in molti dei ragionamenti bioetici che muovono da premesse non naturalistiche, e quindi quali siano le posizioni preferibili (non in assoluto) in base al metodo scientifico. Nella convinzione che nelle società liberal-democratiche sia meglio avere cittadini scientificamente alfabetizzati piuttosto che aderenti a posizioni che universalizzano credenze di parte e causano danno ad altre persone.

Mauro Capocci

Le soluzioni della geoingegneria per il riscaldamento globale

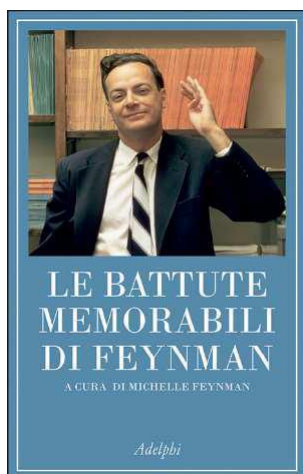
Il pianeta nuovo
di Oliver Morton
Il Saggiatore, Milano, 2017,
pp. 410 (euro 26,00)

Un tempo a parlarne si era presi per matti. Ma ora che il cambiamento climatico incombe, ogni opzione per contenerlo trova più attenzione e anche la geoingegneria è oggetto di studi di primo piano, benché rimanga molto scetticismo. Del resto è naturale provare un po' di paura all'idea di irrorare d'aerosol la stratosfera, sbiancare le nuvole col sale o mandare in orbita enormi specchi, per ridurre l'irradiazione solare a terra. O, ancora sequestrare l'anidride carbonica nel sottosuolo, oppure fertilizzando gli oceani per moltiplicare il plancton fotosintetico, o addirittura con tecnologie di produzione energetica a «emissioni negative» che sottraggano il gas serra dall'aria anziché immetterne.
Quella di Morton, giornalista del settimanale britannico «The Economist», è una guida chiara ed equilibrata per orientarsi fra queste opzioni e farsi un'idea di quanto possiamo aspettarci dalla geoingegneria. Dopo aver illustrato le dinamiche generali dei fenomeni in gioco e i precedenti storici di modificazioni del clima, Morton passa in rassegna le varie proposte considerandone pregi e obiezioni, proponendo molte domande e tracciando svariati scenari, ma dando poche risposte ferme e lasciando molte conclusioni al lettore.
Oltre agli aspetti scientifici e tecnici, il libro considera quelli politici, sociali ed etici, come il rischio che la geoingegneria, anziché far guadagnare tempo per frenare le emissioni, riduca la determinazione su questo fronte. La sfida più ardua, ricorda Morton nel commiato, sta infatti nella capacità dell'umanità di unirsi per gestire processi di questa portata: una sfida che si potrà vincere, ma a conclusione di un percorso politico che deve ancora iniziare.

Giovanni Sabato

Donne in prima linea contro l'Huntington

Ci sono percorsi professionali che a un certo punto dell'esistenza incrociano la vita di altri e non ne escono più, in un mutuo scambio di interessi e umanità. Capita anche nel mondo della ricerca, sebbene il cliché dominante dello scienziato sia quello di una persona con scarso o nessun contatto con la realtà.
E allora ben vengano libri come *Affrontare il rischio genetico e proteggere la speranza* (Mondadori, 2016, pp. 126, euro 14,90), che racconta l'esperienza più che trentennale di donne

coinvolte nella ricerca sulla còrea di Huntington e nell'assistenza a soggetti con questa malattia neurodegenerativa devastante (movimenti involontari via via più frequenti, deterioramento mentale e alterazioni psichiche) e senza cura. Pubblicato su iniziativa dell'Associazione italiana còrea di Huntington (AICH) Roma Onlus, oltre a ospitare storie di pazienti, il libro, curato da Wanda Danzi, vicepresidente dell'AICH, racconta in prima persona l'esperienza di Marina Frontali e Gioia Jacopini, ricercatrici del CNR, Annarita Bentivoglio, Silvia Romano e Maria Spadaro, ricercatrici universitarie, il medico Laura Torrelli, l'assistente sociale Carolina Casciani e Francesca Rosati, presidente dell'AICH. (*gs*)

Le battute memorabili di Feynman
a cura di Michelle Feynman
Adelphi, Milano, 2017,
pp. 410 (euro 26,00)

Ritratto del mago della fisica, battuta per battuta

«Il piacere della fisica, per me, è scoprire quant'è ammirevole, quant'è stupefacente la realtà. Per me è una malattia». Ecco un buon biglietto da visita di Richard Feynman, il fisico del XX secolo più ammirato insieme ad Albert Einstein. Oggetto di culto, come ricorda il fisico e divulgatore britannico Brian Cox nella prefazione, tra generazioni di giovani fisici per la sua visionarietà, maestria comunicativa, ironia e la passione travolgente che metteva nell'indagare la natura, senza fare sconti.
«Se volete sapere come funziona la natura, beh, noi l'abbiamo guardata, ed è fatta così. Non vi piace? Andate da un'altra parte, in un altro universo dove le regole sono più semplici.» Questa raccolta di battute curata dalla figlia Michelle, a volte frasi fulminanti di un rigo, più spesso brevi passaggi da conferenze, interviste, lettere, estratti dai suoi libri, restituiscono uno spaccato efficace della personalità di Feynman e del suo rapporto con la scienza e con la società. La sua idiosincrasia mai celata, al limite dello scherno, per le scienze umane: «Il mio impegno umanistico è sempre stato quello di capire come fare, usando la scienza, a evitare le materie umanistiche. Ho lottato fino all'ultimo sangue». E per converso l'insistenza sulla centralità della cultura scientifica per la società contemporanea: «Non potete dirvi cittadini del nostro tempo se non sentite quanto è meravigliosa ed esaltante questa avventura». Le riflessioni sparse sulla sua esperienza a Los Alamos, quando da studente non ancora laureato era stato coinvolto nel progetto dedicato alla costruzione della bomba atomica, che oscillano dal rovello sulle responsabilità della scienza al senso di liberazione che gli regala la visione di Von Neumann che lo esortava a «non sentirsi responsabili del mondo in cui viviamo». Ma quando farà parte della commissione di indagine sul disastro dello shuttle Challenger del 1986 saprà sfidare la NASA inchiodandola alle sue responsabilità.
Scassinatore di casseforti, decifratore di codici Maya, suonatore di bongo nel tempo libero, Feynman ha saputo regalare agli scienziati strumenti concettuali rivoluzionari come i diagrammi che portano il suo nome, ma pure anticipare l'arrivo delle nanoscienze e intuire le potenzialità della computazione quantistica. Forse la definizione di Hans Bethe è quella che meglio restituisce la statura intellettuale di Feynman:«Ci sono due tipi di genio. I geni comuni fanno grandi cose, ma ci lasciano la sensazione che anche noi ci potremmo riuscire, lavorando abbastanza sodo. E poi ci sono i maghi, di cui non abbiamo idea di come facciano. Feynman era un mago.»

Marco Motta

La salute disuguale
di Michael Marmot
Il Pensiero Scientifico Editore, Roma, 2016, pp. 233 (euro 32,00)

Vincere le ingiustizie della salute è un fatto di democrazia

«Se vivete in un paese con un sistema sociale poco sviluppato, fate qualcosa. Si vedrà la differenza. Se il vostro paese è già sulla buona strada, fate di più. E se siete nei paesi scandinavi, fatelo meglio. Fate qualcosa. Fate di più. Fatelo meglio.» La chiusa del libro di Michael Marmot è una chiamata alla responsabilità a cui nessuno è autorizzato a sottrarsi. Il nome dell'epidemiologo britannico è legato ai suoi studi sui determinanti sociali delle disuguaglianze nella salute, a loro volta strettamente connesse con il livello di giustizia sociale. Facendo continuo riferimento ai dati, resi ancora più comprensibili con l'uso di grafici, Marmot dipinge il ritratto di una società profondamente iniqua, in cui la ricchezza va a braccetto con buona salute e longevità, vanificando secoli di conquiste sociali e contravvenendo ai principi della democrazia. Una società in cui salire su un mezzo pubblico in una grande città significa percorrere un tragitto lungo il quale la speranza di vita scende a ogni fermata, dando l'idea di come il gradiente della salute non sia qualcosa di astratto e ci tocchi da vicino.
Nella sua esposizione chiara e analitica, che non trascura nessun aspetto della «disuguaglianza di salute», l'autore mostra l'inconsistenza dell'approccio paternalistico di chi si sgrava la coscienza compilando elenchi di comportamenti raccomandabili, pensando che chi sbaglia lo faccia per ignoranza. La vera sfida è, al contrario, agire sui fattori che permetteranno al soggetto di fare scelte che favoriranno la sua salute, permettendogli di prendere il controllo della propria vita. Di qui l'esigenza di passare in rassegna tutti questi fattori, per dare risposte concrete al bisogno di giustizia sociale.
Il libro non è solo una foto della società, un quadro desolante su cui meditare, ma è provvisto di una corposa *pars construens*. Vi si sottolinea, tra l'altro, l'importanza delle esperienze dell'infanzia e la necessità di tutelare questa fascia d'età. Si pone, inoltre, l'accento sullo stretto rapporto tra istruzione e benessere sociale, suggerendo su che cosa puntare per migliorare questo aspetto fondamentale.
Il lettore italiano avrà modo di apprezzare anche la postfazione dell'epidemiologo Giuseppe Costa, che muove dall'interrogativo cruciale: «L'Italia sta rispondendo all'appello?» I dati raccolti nei primi studi sembrano giustificare un cauto ottimismo: la strada è aperta e la direzione presa sembra quella giusta. Ma, come direbbe Marmot, tanto resta ancora da fare e c'è lavoro in abbondanza. Per tutti.

Anna Rita Longo

Dare corpo al futuro

La Città della Scienza di Napoli inaugura il primo museo interattivo d'Italia dedicato a salute, prevenzione, scienze e tecnologie biomediche

Esattamente a quattro anni da quel maledetto 4 marzo 2013, quando un incendio ne ha distrutto parte degli edifici, Città della Scienza di Napoli rilancia con l'inaugurazione del primo museo interattivo d'Italia dedicato ai temi della salute, della prevenzione, delle scienze e delle tecnologie biomedicali. Un'operazione importante, articolata su tre livelli, per un totale di 2000 metri quadrati, con una forte vocazione alla sperimentazione diretta da parte dei visitatori. Il successo delle ultime edizioni della manifestazione *Futuro Remoto* e questa inaugurazione lasciano intendere che nonostante ostacoli e difficoltà Città della Scienza non ha intenzione di mollare, ma al contrario di continuare il proprio luminoso percorso nella divulgazione della cultura scientifica.

Il viaggio proposto da *Corporea* si snoda attraverso 14 aree tematiche, per un totale di circa 100 *exhibit,* dedicate ai diversi sistemi che compongono il corpo umano, dall'apparato muscolo-scheletrico al sistema endocrino e all'apparato digerente, passando tra gli altri per il sistema sensoriale, il sistema nervoso e il cervello. Nella nostra vita quotidiana è proprio dall'interazione di tutti questi sistemi che si determina il corretto funzionamento del corpo, mentre le alterazioni degli equilibri possono dare origine a condizioni patologiche più o meno gravi.

Il tema della salute ha una parte importante in *Corporea* e l'accento è messo soprattutto sulle ricadute negative che possono avere determinati comportamenti, innestando quindi sul percorso conoscitivo anche un approfondimento sulla prevenzione che attraversa la mostra. Una sezione speciale è dedicata anche alla storia della medicina dal periodo greco e romano fino ai giorni nostri. Moltissimi i momenti interattivi attraverso gli *open lab* che costellano il percorso espositivo, ma anche, per esempio, attraverso videogiochi *multiplayer* nella sezione dedicata al sistema immunitario o un sistema di stetoscopi e altoparlanti per ascoltare i differenti suoni prodotti dalla digestione.

A testimoniare lo sguardo lungo di Città della Scienza c'è, accanto a quella di *Corporea*, l'inaugurazione prevista per il 19 marzo del Planetario/Dome 3D collegato direttamente al museo: 20 metri di diametro e oltre 120 posti a sedere, per uno spazio immersivo pensato per spettacoli dedicati all'astronomia e a spettacoli didattici su salute e medicina, che promette di diventare una delle attrazioni principali dello *science center* napoletano.

Marco Boscolo

Cortesia Città della Scienza (*tutte le foto, 3*)

Non solo per i grandi. Alcune delle tante installazioni del museo inaugurato alla Città della Scienza di Napoli.

Dove & quando:

Corporea
dal 4 marzo
Città della Scienza
Via Coroglio 57 e 104, Napoli
www.cittadellascienza.it.

L'universo fa boom!

di Anna Ijjas, Paul J. Steinhardt e Abraham Loeb

Le più recenti misurazioni del fondo cosmico a microonde (CMB), sollevano dubbi sulla teoria inflazionaria, secondo la quale lo spazio si espanse esponenzialmente nei primi istanti di vita del cosmo. Le analisi dei dati raccolti dal satellite Planck dell'ESA suggeriscono infatti che si debba riesaminare questo paradigma così apprezzato e considerare nuove idee sulle origini dell'universo.

Il paradosso dell'attività fisica

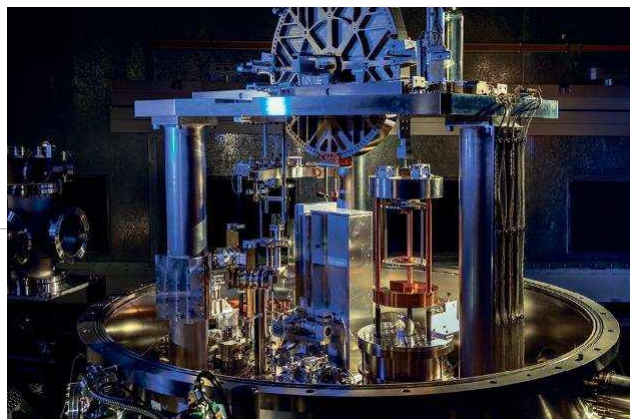
di Herman Pontzer

È opinione comune che chi fa molta attività fisica bruci tante calorie, ma le ricerche rivelano che i cacciatori-raccoglitori bruciano lo stesso numero di calorie di chi fa vita sedentaria. Gli studi sul metabolismo umano aiutano a spiegare il paradosso. E come la nostra specie ha acquisito alcuni dei suoi tratti distintivi.

Un problema di massa

di Tim Folger

Il chilogrammo è l'ultima unità di misura ancora legata a un manufatto fisico, un cilindro di platino-iridio che però sta perdendo massa. Nel 2011 è stato quindi deciso di ridefinire il chilogrammo associandolo a una costante della meccanica quantistica, un processo complicato che ora sta entrando nella fase finale.

The Voorhes (*palloncino cosmico*); Richard Barnes (*bilancia*)

LE SCIENZE S.p.A.

Sede legale: Via Cristoforo Colombo 90, 00147 ROMA.

Redazione: tel. 06 49823181
Via Cristoforo Colombo 90, 00147 Roma
e-mail: redazione@lescienze.it
www.lescienze.it

Direttore responsabile
Marco Cattaneo

Redazione
Claudia Di Giorgio (*caporedattore*), Giovanna Salvini (*caposervizio grafico*), Cinzia Sgheri, Ale Sordi (*grafico*), Giovanni Spataro

Collaborazione redazionale
Folco Claudi, Gianbruno Guerrerio
Segreteria di redazione: Lucia Realacci
Progetto grafico: Giovanna Salvini

Referente per la pubblicità
A. Manzoni & C. S.p.A.
agente Daria Orsi (tel. 02 57494475, 345 4415852)
e-mail dorsi@manzoni.it

Pubblicità:
A. Manzoni & C. S.p.A.
Via Nervesa 21, 20139, Milano, telefono: (02) 574941

Stampa
Puntoweb, Via Variante di Cancelliera, snc, 00040 Ariccia (RM).

Consiglio di amministrazione
Corrado Corradi (presidente), Michael Keith Florek (vice presidente), Gabriele Acquistapace, Markus Bossle, Stefano Mignanego

Responsabile del trattamento dati (D. lgs. 30 giugno 2003 n.196):
Marco Cattaneo

Registrazione del Tribunale di Milano n. 48/70 del 5 febbraio 1970.
Rivista mensile, pubblicata da Le Scienze S.p.A.
Printed in Italy - febbraio 2017

ISSN 2499-0590

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in Chief: Mariette DiChristina; *Executive editor*: Fred Guterl; *Managing Editor*: Ricki L. Rusting; *Board of Editors*: Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong, David Biello, Larry Greenemeier, Ferris Jabr, John Matson

President Steven Inchcoombe;
Executive vice president: Michael Florek;
Vice president and associate publisher: Michael Voss;
Design Director, Michael Mrak

Hanno collaborato a questo numero
Per le traduzioni: Paolo Cocco: *Spiegare il volo, Neuroscienza degli zombie;* Alessandro Conflitti: *Il guerriero ambientalista* Silvio Ferraresi*: Cervelli in laboratorio;* Daniele Gewurz: *Grovigli nello spazio-tempo;* Cristina Serra: *Terapia per il cuore;* Alfredo Tutino: *In difesa del robot disobbediente, Animali sulla scena del crimine.*

Notizie, manoscritti, fotografie, e altri materiali redazionali inviati spontaneamente al giornale non verranno restituiti.

ABBONAMENTI E ARRETRATI
SOMEDIA S.p.A.
Casella Postale 10055 - 20111 Milano
Abbonamenti: abbonamentiscienze@somedia.it
Arretrati e prodotti opzionali: lescienzevendite@somedia.it
Tel. 199.78.72.78 (0864.256266 per chi chiama da telefoni cellulari. Il costo massimo della telefonata da rete fissa è di 14,37 cent di euro al minuto più 6,24 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Per chiamate da rete mobile il costo massimo della chiamata è di 48,4 cent di euro al minuto più 15,62 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Fax 02 26681991.
Abbonamenti aziendali e servizio grandi clienti
Tel. 02 83432422; fax 02 70648237;
mail grandiclienti@somedia.it

Italia	
abb. annuale	€ 39,00
abb. biennale	€ 75,00
abb. triennale	€ 99,00
copia arretrata	€ 9,00
Estero	
abb. annuale Europa	€ 52,00
abb annuale Resto del Mondo	€ 79,00

Accertamento diffusione stampa certificato n. 8286 del 3/2/2017

SAPEVI CHE IN OGNI CELLULA C'È UN FILAMENTO DI DNA LUNGO QUASI 2 METRI?

SAPEVI CHE OGNI CELLULA CONTIENE UN TESTO LUNGO 3000 VOLTE I PROMESSI SPOSI?

SAPEVI CHE TU E LA BANANA AVETE IL 45% DEL DNA IN COMUNE?

SAPEVI CHE LA CIPOLLA HA UN GENOMA 5 VOLTE PIÙ GRANDE DEL TUO?

SAPEVI CHE TU E LA GALLINA AVETE IL 60% DEL DNA IN COMUNE?

DNA la mostra

IL GRANDE LIBRO DELLA VITA DA MENDEL ALLA GENOMICA

10 febbraio > 18 giugno 2017

ROMA, VIA NAZIONALE 194 - PALAZZOESPOSIZIONI.IT

con la collaborazione di

media partner

si ringrazia

sponsor tecnici

vettura ufficiale